



Luís Miguel Batista Marques

Licenciado em Engenharia Mecânica

Ventilação Natural em Edifícios Com Utilização de Chaminés Térmicas

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: José Fernando de Almeida Dias, Professor Associado,
FCT/UNL

Júri

Presidente: José Manuel Paixão Conde, Professor Auxiliar, FCT/UNL

Arguentes: Diana Filipa de Conceição Vieira, Professora Auxiliar Convidada,
FCT/UNL

Vogais: José Fernando de Almeida Dias



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Ventilação Natural em Edifícios e Aproveitamento Energético

Copyright © [Luís Miguel Batista Marques, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus avós, pai, mãe e irmã...

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todos os que de alguma forma contribuíram para estes longos anos de estudo.

Em primeiro lugar, queria agradecer à instituição FCT/UNL e todos os docentes e não docentes que fizeram parte deste percurso. Em especial ao orientador desta dissertação, o Professor José Dias, por todo o apoio e ajuda ao longo destes últimos meses. Também gostaria de agradecer aos colaboradores da Divisão de Apoio Técnico pelo fornecimento de informações relativos ao caso de estudo abordado nesta tese (Biblioteca FCT/UNL).

Aos amigos de toda a vida, em especial aos sete Xamissos.

A todos os amigos que fiz ao longo do curso, em especial ao Breno Gonçalves.

À Cláudia por todo o apoio e ajuda constante.

A toda a minha família, primos, tios.

E em especial, um agradecimento aos meus pais, irmã e avós, a eles dedico este trabalho.

Resumo

Nos últimos anos a preocupação ambiental e a tentativa de redução de consumo elétrico tem vindo a aumentar. Contudo, Portugal continua a apresentar uma produção de energia elétrica maioritariamente produzida através de combustíveis fósseis (72%).

A presente dissertação analisa o potencial existente em volta da ventilação natural utilizada em edifícios e o seu aproveitamento energético. Para isso e com a ajuda do programa de cálculo numérico *ventil.for* [1], escrito atualmente no software *MATLAB*, estudou-se a eficácia da ventilação natural no que toca à velocidade do ar nas aberturas, o número de renovações de ar por hora e também a diferença de temperaturas nas salas habitáveis.

O primeiro passo desta dissertação foi utilizar modelos simples de forma a compreender o programa e os resultados obtidos, modificando a velocidade do vento exterior, as áreas das aberturas, adicionando ventiladores e calculando parâmetros a ter em conta neste estudo.

Por conseguinte criou-se um modelo de aproveitamento do calor solar para se conseguir aquecer ou ventilar espaços, utilizando o modelo como coletor solar ou como chaminé solar, respetivamente.

De modo a perceber se todos os métodos estudados podem ser implementados em um caso real, e qual a seu benefício, criou-se um modelo partindo da simplificação do edifício da Biblioteca da FCT/UNL. Por último, fez-se a análise dos resultados obtidos para este caso de estudo relativo à ajuda energética que o modelo de ventilação natural é capaz de oferecer ao edifício, tendo em conta o número de renovações necessárias nas diferentes salas e também o aquecimento, ou o arrefecimento que se consegue com o modelo aplicado. Consegue-se com este modelo poupar no máximo cerca de 61% da energia de aquecimento para uma das salas em estudo e satisfazer para a maior parte destas as renovações de ar por hora.

De forma sucinta, os resultados obtidos, permitem concluir que é possível criar um mecanismo de ventilação híbrida (natural e mecânica) em grandes edifícios como o da Biblioteca da FCT, onde a ventilação natural e o uso de coletores solares (chaminés térmicas) colaboram para a redução dos custos e da energia associada à ventilação mecânica.

Palavras-chave: Ventilação; Edifícios; Calor; Energia.

Abstract

Nowadays, environmental concerns and the attempt to reduce electricity consumption have increased. However, Portugal electricity production is still based on fossil fuels, around 72%.

This dissertation analyses the existing potential around the natural ventilation used in buildings and its energy use. To this end, and with the help of the numerical calculation program *ventil.for* [1], currently written in the *MATLAB* software, the effectiveness of natural ventilation was studied regarding air velocity in openings, the number of air renewals per hour and the difference in temperatures in living rooms.

It was started by using simple models in order to understand the program and the results obtained, modifying the external wind speed, the areas of the openings, adding fans and calculating parameters to consider in this study.

A solar heat utilization model was created to heat or ventilate spaces, using the model as a solar collector or as a solar chimney, respectively.

In order to understand if all the methods studied can be implemented in a real case, and what is its benefit, a model was created based on the simplification of the FCT/UNL Library building. Finally, an analysis of the results obtained for this case was made from an energy analysis which is a natural ventilation model capable of supporting the building, taking into account the number of renovations required in the different rooms and also the heating, or the cooling that can be achieved with the applied model. This model can save a maximum of about 61% of the heating energy for the study rooms and do a greater part as air renewal.

Briefly, the results show that it is possible to create a hybrid ventilation mechanism (natural and mechanical) in large buildings such as the FCT Library, where natural ventilation and the use of solar collectors contribute to reducing costs. and the energy associated with mechanical ventilation.

Keywords: Ventilation; Buildings; Heat; Energy.

Índice Geral

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Índice Geral.....	xiii
Índice de Tabelas	xv
Índice de Figuras	xvii
Lista de acrónimos.....	xxii
Capítulo 1 - Introdução.....	25
1.1 A Ventilação Natural	25
1.2. Princípios da Ventilação Natural	27
1.3. Tipos de estratégias para a Ventilação Natural	29
Capítulo 2 - Modelo analítico simplificado para a ventilação natural.....	31
2.1. Equações do modelo analítico	31
2.1.2. Equações de Bernoulli.....	32
Capítulo 3 - Casos Tutoriais	35
3.1. Caso 1 – Paredes adiabáticas sem geração de calor.	36
3.2. Caso 2 – Paredes adiabáticas com geração de calor.	37
3.3. Caso 3 – Paredes não adiabáticas com geração de calor.....	38
3.4. Caso 4 – Aberturas na mesma fachada	40
3.5. Caso 5 – Dois espaços com paredes adiabáticas e sem geração de calor.....	42
3.6. Dois espaços com paredes adiabáticas e com geração de calor	44
3.7. Dois espaços e uma chaminé, todos com paredes adiabáticas e fonte de calor.	46
3.8. Dois espaços e uma chaminé, todos com paredes não adiabáticas e fonte de calor.....	49
3.7. Ventilação mecânica.....	51
Capítulo 4. Coletor solar térmico.....	57
4.1. Inercia térmica	57
4.2 Caso experimental – Modelo coletor térmico	60
Capítulo 5 - Recirculação de ar em aberturas de grande área.....	65
5.1. 1º Caso – Aberturas completas	66
5.2. 2º Caso – Aberturas divididas sem e com geração de calor.....	67
Capítulo 6 - Caso de estudo – Biblioteca da FCT/UNL	69
6.1. Introdução.....	69
6.2 O Edifício: Plantas, áreas e equipamentos	69
6.2.1 Plantas.....	69

6.2. Modelação e simplificação do caso de estudo	71
6.3. Áreas e volumes dos espaços	73
6.4. Construção do edifício.	73
6.4.1. <i>Paredes exteriores e interiores</i>	74
6.4.2. <i>Cobertura</i>	75
6.4.3. <i>Envidraçados</i>	75
6.5. Equipamentos e calor libertado	75
6.6. Modelação do edifício – Inverno e Verão	78
6.6.2. <i>Estação de aquecimento (Inverno)</i>	78
6.6.3. <i>Estação de arrefecimento (Verão)</i>	78
Capítulo 7 - Otimização do caso de estudo	81
7.1. 1º Caso - Verão	81
7.2. 2º Caso – Verão	83
7.3. 1º Caso - Inverno	84
7.4. 2º Caso – Inverno	87
7.5. 3º Caso – Inverno	90
7.6. Áreas das aberturas propostas	92
7.7. Edifício final	93
Capítulo 8 - Parâmetros de calculo	95
8.1 Coeficiente de pressão	95
8.2 Temperatura exterior	97
8.3. Taxas de ventilação	98
8.4. Distribuição de <i>Weibull</i> e orientação do vento.	99
8.5. Potência do coletor solar térmico	102
Capítulo 9 - Resultados finais	105
9.1 Recirculação nas aberturas de grande área	105
9.2. Renovações de ar - Inverno	107
9.3. Renovações de ar – Verão	109
9.4. Solução Construtiva – Renovações de ar	111
9.5. Diferença de temperatura	112
Capítulo 10 – Conclusão e Desenvolvimentos Futuros	119
10.1 – Conclusões e síntese dos resultados obtidos	119
10.2 – Desenvolvimentos Futuros	121
Referências	123
Anexos	125

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Áreas das aberturas interiores	72
Tabela 2-Pés direitos	73
Tabela 3-Áreas e volumes das salas do edifício	73
Tabela 4- Construção das paredes exterior.....	74
Tabela 5 - Construção das paredes interiores	74
Tabela 6 - Ocupação, máquinas e calor libertado em cada espaço.....	76
Tabela 7 - Calor total libertado em cada espaço.....	77
Tabela 8 - Renovações por hora em função utilização de chaminé.....	92
Tabela 9-Coefficientes de pressão nas paredes do caso de estudo	96

Índice de Figuras

Figura 1 - Variação do perfil de velocidades do vento com a altura e e diferentes terrenos.	27
Figura 2-Efeito térmico - Ventilação natural.....	28
Figura 3 - Perfil da distribuição da pressão em torno de um edifício simples [5]	28
Figura 4-Modelo experimental para calculo do coeficiente de pressão.	29
Figura 5-Ventilação cruzadas – Janelas [10].....	30
Figura 6 Ventilação cruzadas - Plantas abertas[10].....	30
Figura 7- Efeito chaminé - Fluxo interno. Fonte: [10]	30
Figura 8- Efeito chaminé - Fluxo acelerado. Fonte: [10]	30
Figura 9 - Ilustração da sala em estudo	35
Figura 10 - Evolução da velocidade do ar nas aberturas (V_1 , V_2) em função da velocidade do vento exterior (U_0).....	36
Figura 11 - Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior (U_0)	36
Figura 12-Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função da velocidade do vento exterior (U_0).....	37
Figura 13-Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior(U_0) ...	37
Figura 14-Variação da diferença de temperaturas entre a habitação e o exterior em função da velocidade do vento	38
Figura 15-Variação da diferença de temperaturas entre a habitação e o exterior em função da velocidade do vento, com geração de calor e paredes não adiabáticas..	39
Figura 16-Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior(U_0), com geração de calor e paredes não adiabáticas.....	39
Figura 17-Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função do vento exterior, com geração de calor e paredes não adiabáticas	39
Figura 18-Ilustração de habitação com 4 aberturas na mesma fachada	40
Figura 19-Evolução da velocidade nas aberturas 1 e 2 (inferiores) em função do calor gerado na habitação.	41
Figura 20-Evolução da velocidade nas aberturas 3 e 4 (superiores) em função do calor gerado na habitação	41
Figura 21- Evolução das renovações de ar por hora na habitação em função do calor gerado.	41
Figura 22- Evolução da diferença de temperatura entre a habitação e o exterior em função do calor gerado.	42
Figura 23 - Geometria do edifício para o estudo de casos com dois espaços.....	43
Figura 24 - Evolução da velocidade na entrada 1 em função do vento exterior.....	43

Figura 25- Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior	43
Figura 26- Ilustração da habitação com dois espaços internos e geração de calor no espaço da direita	44
Figura 27- Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função do vento exterior, com geração de calor no espaço da direita.	44
Figura 28- Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior, com geração de calor no espaço da direita	45
Figura 29- Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da direita o e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor no espaço da direita.	45
Figura 30-Geometria de uma habitação com dois espaços e uma chaminé	46
Figura 31-Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita.	47
Figura 32- Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da direita o e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita	47
Figura 33 Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da direita o e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita.	48
Figura 34 - Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita e paredes não adiabáticas.	49
Figura 35:Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita e paredes não adiabáticas.	49
Figura 36 - Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da direita o e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita e paredes não adiabáticas.	50
Figura 37 - Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da esquerda o e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita e paredes não adiabáticas	50
Figura 38 - Ventilador a favor do sentido do vento exterior	51
Figura 39 - Curvas do ventilador AW SILEO EC [14]	52
Figura 40 - Curvas do ventilador a diferentes velocidades de rotação.....	53
Figura 41 - Funcionamento do ventilador/ Área das aberturas em função da velocidade do vento	54
Figura 42 - Ventilador contra o sentido do vento exterior	55
Figura 43- Funcionamento do ventilador/ Área das aberturas em função da velocidade do vento	55

Figura 44 - Perfis de temperatura de uma parede pesada ($>750\text{kg/m}^2$) ao longo de um dia [13]	58
Figura 45 - Ilustração do modelo a estudar	58
Figura 46 - Caso parede de inercia térmica - Inverno	60
Figura 47 - Caso parede inercia térmica - Verão.....	60
Figura 48 - Calor libertado pela parede durante um dia de Inverno.....	61
Figura 49 - Calor libertado pela parede durante um dia de Verão	61
Figura 50 - N° de Renovações por hora do espaço habitável durante um dia de verão..	62
Figura 51-N° de Renovações por hora do espaço habitável durante um dia de inverno	62
Figura 52 - Diferença de temperatura no espaço habitável durante o dia de inverno	63
Figura 53 -Ilustração dos tipos de aberturas	66
Figura 54 - Ilustração do 1º Caso com direção e intensidade do ar nas aberturas.....	67
Figura 55 - Ilustração do 2º Caso com direção e intensidade do ar nas aberturas.....	67
Figura 56 - Ilustração do 2º Caso, direção e intensidade do ar nas aberturas com geração de calor nos espaços	68
Figura 57 - Planta do piso -1 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL) [20]	70
Figura 58 - Planta do piso 1 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL) [20].....	70
Figura 59- Planta do piso 0 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL)[20].....	70
Figura 60 -Planta do piso 2 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL) [20].....	71
Figura 61 - Planta do piso 3 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL) [20].....	71
Figura 62 - Desenho 3D em perspetiva do edifício em estudo (medidas reais em metros)	72
Figura 63 - Paredes exteriores	74
Figura 64 - Paredes interiores	74
Figura 65 - Ilustração do edifício do 1º caso - Verão	82
Figura 66 - N° Renovações vs Velocidade vento exterior – 1º caso verão.....	82
Figura 67 - Ilustração do edifício do 2º caso - Verão	83
Figura 68 - N° Renovações vs Velocidade vento exterior – 2º caso verão.....	83
Figura 69- Ilustração do edifício do 1º caso - Inverno	84
Figura 70 - Evolução do n° renovações / h em função da velocidade do vento exterior – 1º Caso Inverno	85
Figura 71 - Evolução da diferença de temperatura no espaço 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 1º Caso Inverno	85
Figura 72 - Evolução da velocidade do ar nas aberturas 1 e 2 em função da velocidade do vento exterior - 1º Caso Inverno	86
Figura 73 - Ilustração do fenómeno de recirculação do ar	87
Figura 74 - Ilustração do edifício do 2º caso - Inverno	87

Figura 75 - Evolução do nº renovações / h em função da velocidade do vento exterior – 2º Caso Inverno	88
Figura 76 - Evolução da diferença de temperatura no espaço 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 2º Caso Inverno	88
Figura 77 - Evolução da velocidade do ar nas aberturas 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 2º Caso Inverno	89
Figura 78 - Ilustração do edifício do 3º caso - Inverno	90
Figura 79 - Evolução do nº de renovações/h dos espaços 1 e 2 em função da velocidade do vento exterior - 1º Caso Inverno	90
Figura 80 - Evolução da diferença de temperatura no espaço 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 3º Caso Inverno	91
Figura 81 - Evolução da velocidade do ar nas aberturas 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 3º Caso Inverno	91
Figura 82 - Edifício com as modificações e sentido do ar nas aberturas para a estação de arrefecimento	93
Figura 83 - Edifício com as modificações e sentido do ar nas aberturas para a estação de aquecimento.....	93
Figura 84 - Vento incidente na fachada traseira.....	95
Figura 85 - Vento incidente na fachada principal.....	95
Figura 86 - Vento incidente na fachada lateral esquerda.....	96
Figura 87 - Vento incidente na fachada lateral direita.....	96
Figura 88-Temperatura ao longo de um dia de verão na região de Almada	98
Figura 89 - Alguns valores do parâmetro k da distribuição de Weibull para Portugal Continental (A partir de dados do INETI para ano 1999) [33].]	100
Figura 90 - Distribuição de Weibull	101
Figura 91 - Distribuição anual da direção do vento em percentagem [34].....	101
Figura 92 - Potência solar fornecida ao coletor A e B na estação de arrefecimento (mês de janeiro).	103
Figura 93- Potência solar fornecida ao coletor do bloco D no inverno em função da hora solar	103
Figura 94 - Potência solar fornecida ao coletor do bloco A e B no verão em função da hora solar	104
Figura 95 - Potência solar fornecida ao coletor do bloco D no verão em função da hora solar	104
Figura 96 - Direções e velocidades do ar na abertura A - B bloco superior.....	106
Figura 97-Direções e velocidades do ar na abertura B-C-D bloco superior.....	106

Figura 98 - Evolução do nº de renovações por hora nos espaços em função da velocidade do vento exterior para as 15h no inverno	107
Figura 99 - Evolução do nº de renovações por hora nos espaços em função da velocidade do vento exterior para as 15h no inverno.	108
Figura 100 - Evolução do nº de renovações por hora nos espaços em função da velocidade do vento exterior para as h no verão	109
Figura 101 - Evolução do nº de renovações por hora nos espaços em função da velocidade do vento exterior para as 15h no verão	110
Figura 102 - Rotação do ventilador e área da abertura vs. velocidade do vento para obter 3 renovações/h	111
Figura 103 - Evolução da temperatura interior da sala A inferior durante o horário de funcionamento do edifício no verão.	113
Figura 104 - Evolução da temperatura interior da sala A inferior durante o horário de funcionamento do edifício no inverno.....	113
Figura 105 - Evolução da temperatura interior da sala D superior durante o horário de funcionamento do edifício no inverno.....	114
Figura 106 - Evolução da temperatura interior da sala D superior durante o horário de funcionamento do edifício no verão	114
Figura 107 - Aumento da T.I dado pelo sistema de climatização, com e sem coletor, para a sala A inferior no inverno	114
..Figura 108 - Aumento da T.I fornecido pelo sistema de climatização, com e sem coletor, para a a sala D superior no inverno	114
Figura 109 - Diminuição da T.I. dado pelo sistema de climatização, com e sem coletor, para a sala A inferior no verão.....	114
Figura 110 - Diminuição da T.I. dado pelo sistema de climatização, com e sem coletor, para a sala D superior no verão	114

Lista de acrónimos

A- área

A_k - Área da abertura k

C_{pk} - Coeficiente de pressão no exterior da abertura k

C_{p0} - Calor específico do ar

D- Diâmetro

g- Aceleração da gravidade

N- Número de incógnitas do problema

NA(I)- Número de aberturas em cada espaço interno I

NESP- Número de espaços internos

P- Pressão

P_1 - Pressão ventilador

P_2 - Pressão referencia do ventilador

ω_1 - Velocidade rotação do ventilador

ω_2 - Velocidade rotação de referência do ventilador

Pot- Potência

P_0 - Pressão estática de referência

P_i - Pressão no espaço interno i

P_k - Pressão no exterior da abertura k

Q- Caudal volúmico

Q_i - Calor gerado no espaço i

Rot, ω - Velocidade de rotação do ventilador

T_0 - Temperatura exterior

T_i - Temperatura do espaço interno i

U_0 - Velocidade do vento

U_k - Velocidade média na abertura k

U_{crit} - Velocidade do vento para a qual o edifício garante o número de renovações mínimas no espaço habitado

$\Delta\rho_i$ - Diferença entre a massa volúmica do ar no espaço i e a massa volúmica do ar exterior

ρ_i - Massa volúmica do ar no espaço i

ρ_0 - Massa volúmica do ar no exterior

ζ_k - Coeficiente de perda de carga na abertura k

ζ_{in} - Coeficiente de perda de carga à saída da chaminé quando o ar entra

ζ_{out} - Coeficiente de perda de carga à saída da chaminé quando o ar sai

α - Absorsividade

e - Transmissibilidade

Q_p - Calor libertado pela parede

I - Aportação solares através do vidro

f - Fctor de inercia térmica da parede

F_{gs} - Fator total ganho solar através do vidro

b - Comprimento edifício (caso de estudo)

h - Altura do edifício (caso de estudo)

d - Largura do edifício (caso de estudo)

Capítulo 1 - Introdução

1.1 A Ventilação Natural

A ventilação natural é um método cada vez mais utilizado nas construções atuais, pois existe progressivamente mais preocupações com os temas ambientais e conforto nas habitações. A preocupação com o ambiente e com o aquecimento global é um dos temas que está a levar a ventilação natural a ser estudada com mais cuidado e pormenor. Estudos feitos demonstram que a utilização da ventilação natural pode reduzir até 33% o consumo de energia de um edifício [2]. Por outro lado, o ar fresco nas habitações é um elemento importante para a saúde humana, assegurando uma adequada ventilação dos contaminantes do ar, adequadas condições de temperatura e dissipação de humidade, contribuindo assim para o bem-estar humano [3]. Esta contribuição deve-se aos seguintes fatores:

- A ventilação de ar promove oxigénio necessário para a processo de vida humana; 4 segundos é o tempo que o ar inalado demora a passar através do sistema respiratório e transferir oxigénio para o sangue e depois para o cérebro [2], qualidade pobre de ar deficiente em nível de oxigénio e consequentemente elevada concentração de CO₂ conduz no ser humano a dificuldades de pensamento e défice de concentração.
- As contaminações causadas por excesso de CO₂ provenientes da respiração humana, odores, fumos de cigarros ou emissões por outros processos como poeiras, alergénicos aerossóis, gases tóxicos ou até calor excessivo são evitados com a ventilação adequada dos espaços.
- Quando a humidade relativa do ar é elevada, para além do desconforto que os ocupantes sentem, podem ocorrer condensações em locais cuja temperatura superficial se encontre abaixo do respetivo ponto de orvalho. A existência de água no estado líquido depositada nas superfícies ou impregnando materiais higroscópicos pode criar um meio propício ao desenvolvimento de fungos e de bolores, e daí resultar a danificação desses materiais ou a criação de um ambiente pouco saudável para a permanência dos ocupantes [4].

Para a ventilação natural ser eficaz, tem de existir uma boa relação entre a arquitetura do edifício, o meio envolvente e a sua localização geográfica. Os edifícios devem

Capítulo 1 - Introdução

ser desenhados para tirar a maior vantagem das forças naturais, como o vento, temperatura e luz solar [5]. Tudo isto tendo a conta a possível utilização de equipamentos que ajudam a melhorar a ventilação natural, como aquecimento de habitações, torres de vento, chaminés e chaminés solares.

Os benefícios da ventilação natural em relação à ventilação forçada são os seguintes:

- Menor energia consumida;
- Menos equipamentos mecânicos no edifício;
- Menor manutenção de equipamentos;
- Maior durabilidade;
- Redução de ruídos;
- Maior controlo da temperatura e qualidade do ar para os ocupantes.
- Menor custo;
- Maior nível de luz natural [5]

Por outro lado, o uso da ventilação natural também pode levar a desvantagens como:

- As velocidades do vento e as diferentes pressões geradas são variáveis e difíceis de controlar;
- Tem de existir uma integral aproximação entre arquitetos e engenheiros para desenvolver a melhor geometria do edifício.
- Não existe filtração ou controlo entre a poluição e humidade exterior [5]

1.2. Princípios da Ventilação Natural

Neste subcapítulo são apresentados e explicados os princípios que geram a ventilação natural.

O vento é causado quando existem diferenças de pressões na atmosfera, o geral fluxo de vento junto à superfície está sujeito aos efeitos da teoria da camada limite, onde a velocidade do vento é influenciada pelo atrito do terreno junto ao solo [5]. Esta influência varia de região para região, devido aos diversos obstáculos que essa região possui junto ao solo. Assim a ventilação natural é afetada consoante a zona onde o edifício está construído. Na seguinte figura pode-se visualizar este efeito em três zonas distintas: grande cidade, pequena urbanização e espaço livre de obstáculos. Nas grandes cidades, parte do vento encontra grandes e contínuos obstáculos (vivendas, prédios, indústrias, árvores entre outro) reduzindo a sua velocidade consideravelmente no perfil da camada limite.

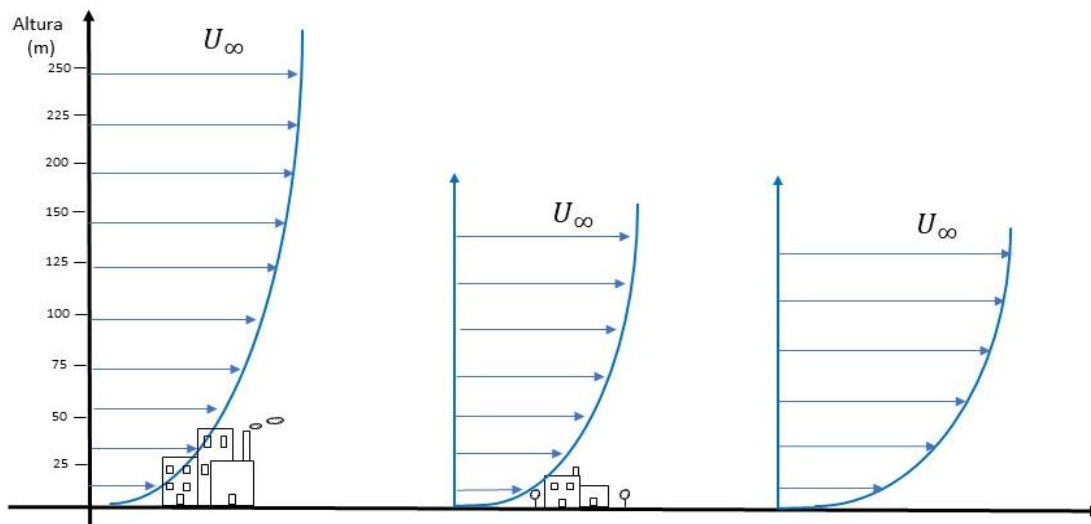


Figura 1 - Variação do perfil de velocidades do vento com a altura e e diferentes terrenos.

Para que a ventilação natural ocorra, é necessário que exista uma diferença de pressões entre duas zonas, que pode ser provocada principalmente por duas ações distintas:

- Ação do Vento, que é gerado através de diferenças de pressões na atmosfera. Quando o vento encontra um edifício gera uma diferença de pressão entre a parede incidente e a parede contrária do edifício, esta diferenças de pressões é dada devido à diminuição da velocidade do vento na parte frontal (incidente) e aumento na parte traseira, gerando assim uma pressão maior no farte frontal e menor na parte traseira. Este fenómeno conduz o vento a entrar nas aberturas do edifício que se encontraram na fachada frontal, e a sair na fachada traseira [6].

- Temperatura. Quando é gerada uma diferença de temperaturas, esta gera diferenças de pressões, pois o ar mais quente é menos denso e ascende. Esta diferença de pressões, origina um fluxo de ar das zonas de pressão mais elevada para as zonas de menor pressão. A coluna de ar no exterior “empurra” a coluna de ar no interior, por ter menos massa, obrigando assim a coluna exterior a entrar no espaço e a coluna interior a sair, criando correntes de ar. A seguinte figura ilustra este fenómeno [7].

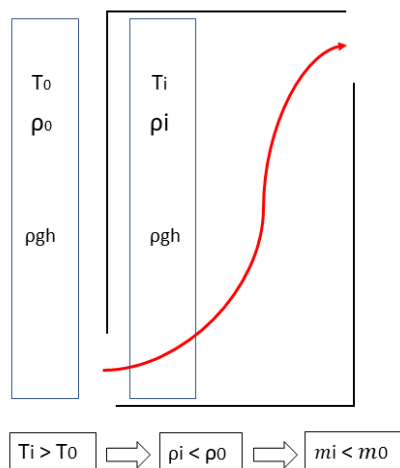


Figura 2-Efeito térmico - Ventilação natural

Estes dois tipos podem e costumam acontecer simultaneamente, originando uma maior diferença de pressão e consequentemente maior ventilação. Esta diferença de pressão pode ser medida e calculada através dos coeficientes de pressão (C_p) em ambos os lados das paredes ou fachadas, sendo que o lado frontal onde o vento incide irá ter um coeficiente de pressão positivo e o lado oposto um coeficiente negativo, sendo que este valor é tanto maior quanto maior for a velocidade de vento no exterior. Os C_p's, são coeficientes medidos através da diferença que existe entre lados opostos do edifício. Na figura seguinte, pode-se observar a distribuição da pressão em torno de uma habitação simples [5].

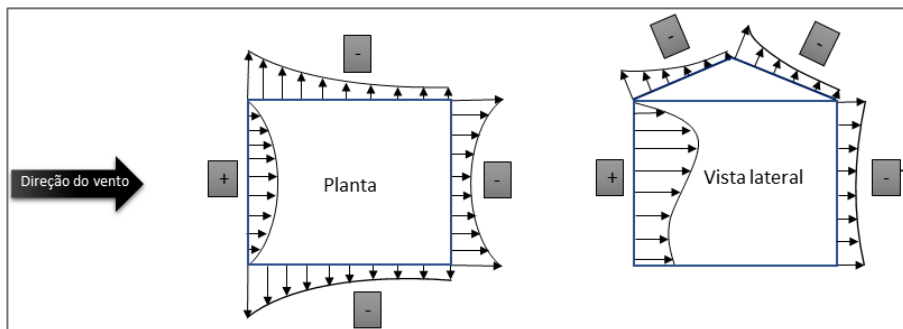


Figura 3 - Perfil da distribuição da pressão em torno de um edifício simples [5] .

1.3. Tipos de estratégias para a Ventilação Natural

Os coeficientes de pressão são calculados experimentalmente, muitas vezes em tuneis de vento. A seguinte figura mostra um método para calcular os coeficientes de pressão em torno de um edifício, onde é medida a pressão do vento atmosférico a 10m, utilizando um tubo de *Pitot*. Da mesma forma também é medida a pressão nas paredes do edifício em orifícios (tomadas de ar), como se pode ver na figura. Por sua vez o coeficiente de pressão no sítio específico onde se encontra a tomada de pressão na parede do edifício é dado pela diferença desta pressão na parede com a pressão do vento exterior a 10 metros de altura [8].

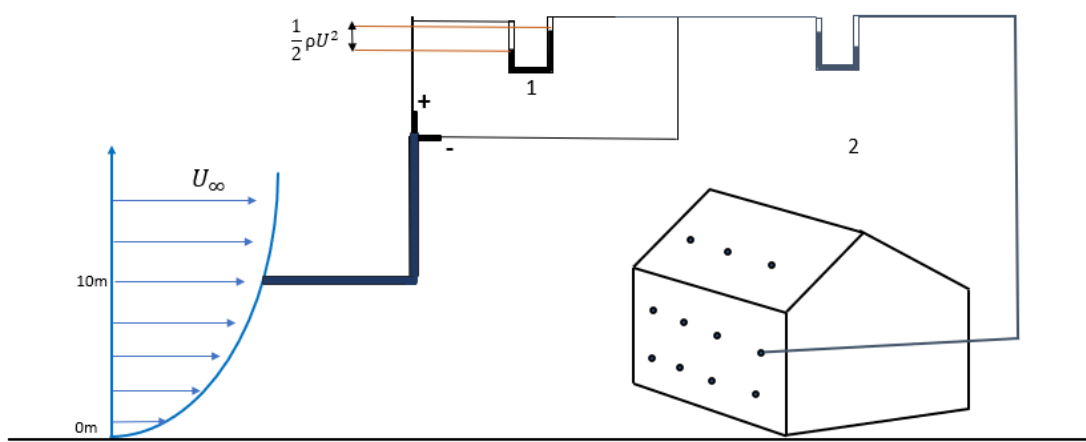


Figura 4-Modelo experimental para calculo do coeficiente de pressão.

1.3. Tipos de estratégias para a Ventilação Natural

Neste subcapítulo são explicadas as duas estratégias mais utilizadas para a utilização da ventilação natural: ventilação cruzada e efeito chaminé.

Na ventilação cruzada devem existir aberturas (como janelas) em fachadas opostas do edifício, a diferença de pressões explicada anteriormente forçará fluxo de ar a entrar e a sair da habitação através dessas aberturas que devem direcionar o fluxo de ar através da área habitável do edifício. O fluxo de ar interno será determinado pela posição das aberturas de entrada e das aberturas de saída em relação à corrente de ar. Se o vento é obrigado a mudar de direção dentro do ambiente uma maior parcela do ambiente será ventilado (figura 5) [9]

Plantas abertas com o mínimo de divisórias que criam espaços fluidos permite a circulação de ar entre os ambientes internos e o exterior. Para promover a ventilação as divisórias devem ser ajustáveis e localizadas em posições que ofereçam menor resistência ao fluxo de ar (figura 6) [10].

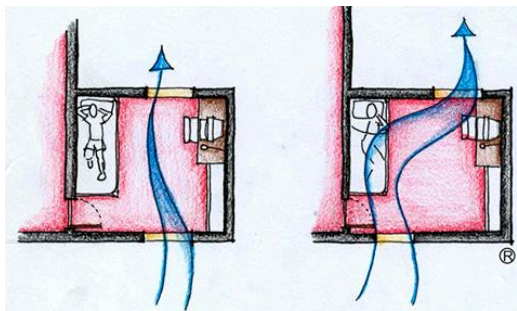


Figura 5-Ventilação cruzadas – Janelas [10].

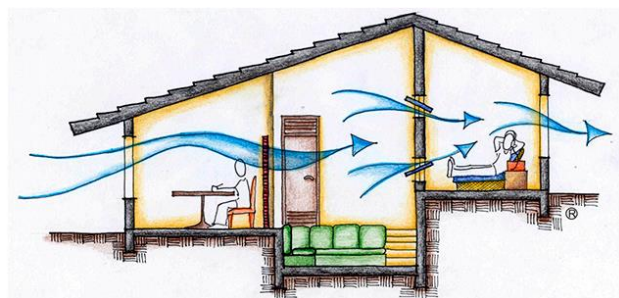


Figura 6 Ventilação cruzadas - Plantas abertas[10]

O efeito chaminé tem por base a capacidade de o ar menos denso (mais quente) subir e provocar fluxos de ar, como explicado anteriormente. Aberturas como chaminés ajudam a que este fenómeno aconteça mais facilmente. Deste modo as habitações devem ter aberturas superiores em áreas centrais para servir como condutor de ventilação natural, promovendo o fluxo ascendente [10](figura 7) .

Para acelerar o fluxo de ar é possível utilizar na parte superior da chaminé um envidraçado de forma a aquecer o interior da chaminé com os raios solares, ou mesmo utilizar uma chaminé solar com aquecimento próprio. Existirá assim maior diferença de temperatura e consequentemente maior diferença de pressões originando maior deslocação de ar entre a chaminé e a habitação [10] (figura 8).

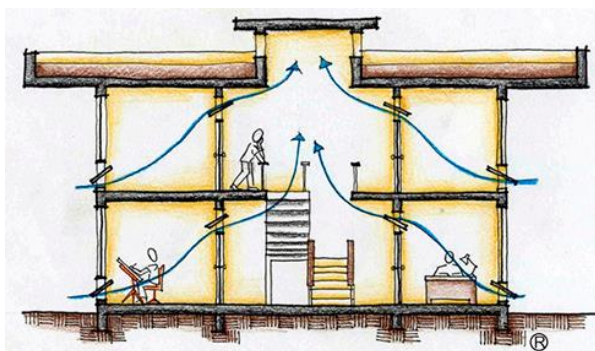


Figura 7- Efeito chaminé - Fluxo interno. Fonte: [10]

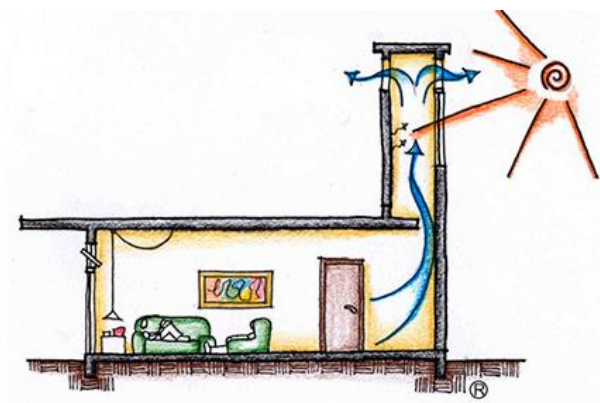


Figura 8- Efeito chaminé - Fluxo acelerado. Fonte: [10]

Capítulo 2 - Modelo analítico simplificado para a ventilação natural

Neste capítulo apresenta-se o programa de cálculo utilizado na presente dissertação.

O programa utilizado foi desenvolvido em MATLAB e conta com diversas equações matemáticas que permitem o cálculo de diversos parâmetros associados à ventilação natural. Foi criado com o objetivo de ultrapassar dificuldades associadas ao cálculo das estimativas dos parâmetros da circulação de ar nos edifícios.

O modelo considera um edifício como sendo n espaços internos e cada um destes espaços com m aberturas e I paredes. O número de incógnitas (N) que o programa calcula tem por base o número de espaços internos (NESP) e o respetivo número de aberturas em cada um desses espaços. Existe então uma incógnita para a velocidade em cada uma das aberturas, e mais três, para a pressão, massa volúmica e temperatura em cada um dos espaços [11]

$$N = \sum_{i=1}^{NESP} (N^{\circ}_{Aberturas}(I) + 3) \quad (1)$$

Partindo do conhecimento da distribuição de pressão resultantes da ação do vento obtida experimentalmente em modelos do edifício na zona das aberturas o programa calcula os seguintes resultados associados a cada espaço em estudo: velocidades do vento nas aberturas, número de renovações de ar por hora, número de Froude, wind/heat power ratio (ψ), diferenças de pressão, densidade e temperatura.

2.1. Equações do modelo analítico

De seguida são apresentadas as equações que resolvem e estão por detrás do modelo analítico.

2.1.1. Equação da continuidade

A seguinte equação corresponde à equação da continuidade para cada espaço interno i , onde U_k

Capítulo 2 - Modelo analítico simplificado para a ventilação natural

é a velocidade média na abertura k e A_k a sua respetiva área. A velocidade U_k é positiva quando o ar entra no espaço i e negativa quando sai desse espaço [11]

$$\sum_{k=1}^{m_i} U_k A_k = 0 \quad (2)$$

2.1.2. Equações de Bernoulli

Para se obter as velocidades em cada uma das aberturas são utilizadas as equações de Bernoulli adaptadas a cada tipo de abertura. Para as aberturas simples como portas e janelas, tem-se a seguinte equação [11].

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k)g + (P_i^* - P_i) - \frac{1}{2}\zeta_k \rho_0 U_k |U_k| = 0 \quad (3)$$

O primeiro termo da equação corresponde à impulsão térmica, o segundo às diferenças de pressão e o terceiro às perdas de carga na abertura. ζ_k é o coeficiente de perda de carga da abertura k e é um valor obtido experimentalmente. O índice $*$ indica os valores das variáveis no espaço em comunicação com o espaço i , através da abertura k .

Quando a abertura k comunica com o exterior, P_i^* , é igual ao valor de P_k . Este valor é calculado através da seguinte equação [11].

$$P_k = \frac{1}{2} C_{pk} \rho_0 U_0^2 \quad (4)$$

Na equação anterior, C_{pk} , é também um parâmetro experimental, correspondente ao coeficiente de pressão no exterior da abertura k devido à ação do vento. Este coeficiente pode ser expresso por:

$$C_{pk} = \frac{P_k - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (5)$$

Para chaminé cilíndrica, as equações foram obtidas experimentalmente [11], tendo em conta o seu funcionamento quer como exaustor, quer como sorvedor, podendo ser expressas pelas seguintes relações.

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i - (1 + \zeta_{out}) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0, \left(\frac{U_i}{U_0} < -1 \right) \quad (6)$$

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i + C_{pk} \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 - (1 + \zeta_{in}) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0, \left(\frac{U_i}{U_0} < 0 \right) \quad (7)$$

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i + C_{pk} \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 + F \left(\frac{U_i}{U_0} \right) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0, \left(-1 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq 0 \right) \quad (8)$$

Com,

$$F \left(\frac{U_i}{U_0} \right) = -1,25 \sin \left(\frac{\frac{\pi}{2} U_i}{0,8 U_0} \right) \text{ se } -0,8 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq 0 \quad (9)$$

$$F \left(\frac{U_i}{U_0} \right) = -1,25 \text{ se } -1,0 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq -0,8 \quad (10)$$

Nas equações anteriores o coeficiente de pressão à saída da chaminé é $C_{pk} = -1,15$ quando se considera $\zeta_{out} = 1,1$ e $\zeta_{in} = 0,8$, que são os coeficientes de perda de carga à saída da chaminé, quando o ar entra ou sai [11]. O termo U_i é a velocidade na abertura da chaminé e o termo U_0 refere-se à velocidade do vento exterior.

Para aberturas com ventilador de velocidade variável as equações são obtidas apartir das curvas de funcionamento características do ventilador, aproximadas a um polinómio de 2º grau. Tendo em conta a análise adimensional [12], obtém-se as seguintes equações para o ventilador a funcionar como insuflador e exaustor.

- Insuflador:

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) = A_v \times U \times |U| + B_v \left(\frac{Rot}{Rot_{Ref}} \right)^2 \quad (11)$$

- Exaustor:

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) = A_v \times U \times |U| - B_v \left(\frac{Rot}{Rot_{Ref}} \right)^2 \quad (12)$$

Nestas equações A_v e B_v são as constantes obtidas da interpolação. Rot é a velocidade de rotação do ventilador escolhido (em r.p.m) e Rot_{ref} é a sua velocidade de referência.

2.1.3. Equação da energia

Em seguida é apresentada a equação da energia utilizada para cada espaço interno i. Entra nesta equação o calor gerado no espaço i (Q_i). O coeficiente k corresponde à respetiva abertura e p à respetiva parede em contato com referido espaço i [11]

$$Q_i + \sum_{n=1}^{mi} (\rho_0 c_{p_0} U_k A_k T^+) + \sum_{n=1}^{mi} h_p A_p (T_i - T_i^{**}) = 0 \quad (13)$$

O coeficiente ** corresponde ao espaço em comunicação com o espaço i através da parede p. O valor de T^+ é o mesmo de T_i se a velocidade média na abertura for negativa ou, igual a T_i^* caso esta seja positiva. Esta equação foi essencial para os casos em que existe uma fonte interna de calor no espaço i [11].

2.1.4. Equação dos gases perfeitos

Por fim, é utilizada a equação de estado dos gases perfeitos para cada espaço interno i. Assume-se aqui que o ar se comporta como um gás ideal, obtém-se então a seguinte equação de estado para cada espaço [11].

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} + \frac{T_i - T_0}{T_0} = 0 \quad (14)$$

Capítulo 3 - Casos Tutoriais

De modo a estudar e perceber o funcionamento do programa do modelo analítico simplificado para ventilação natural em linguagem MATLAB foram estudados vários casos simples de habitações sujeitas a ventilação natural.

Em todos os casos deste capítulo e do próximo admitiu-se que todos os elementos de abertura possuem uma perda de carga $\varepsilon_k = 2,5$ e os coeficientes de pressão (C_p) são considerados +1 e -1 (constantes) consoante o sentido do vento. Faz-se variar a intensidade do vento entre 0 e 11 m/s, de modo a obter os resultados apresentados em gráficos posteriormente referentes às velocidades nas aberturas, renovações de ar por hora (número de vezes que o volume de ar naquela habitação é trocado por unidade de tempo) e diferenças de temperaturas entre a habitação e o exterior (ΔT), sempre em relação à velocidade exterior do vento.

Os resultados apresentam-se com o sentido do vento exterior da esquerda para a direita (eixo positivo das abcissas), e da direita para a esquerda (eixo negativo das abcissas), como está representado no primeiro gráfico, figura 10. Este método será utilizado no decorrer de todo o trabalho.

Na figura seguinte apresenta-se a simples geometria cúbica referente aos três primeiros casos apresentados de seguida, onde se faz variar a existência de paredes adiabáticas assim como a geração de calor no espaço.

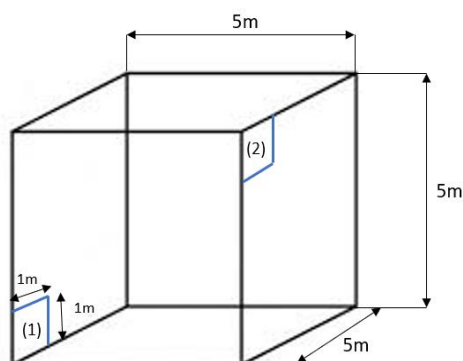


Figura 9 - Ilustração da sala em estudo

3.1. Caso 1 – Paredes adiabáticas sem geração de calor.

Começando por estudar o espaço apresentado anteriormente sem paredes adiabáticas e sem geração de calor interior, apresentam-se os seguintes gráficos referentes à velocidade do ar nas aberturas e a evolução do número de renovações por hora obtido no espaço em função da velocidade do vento exterior.

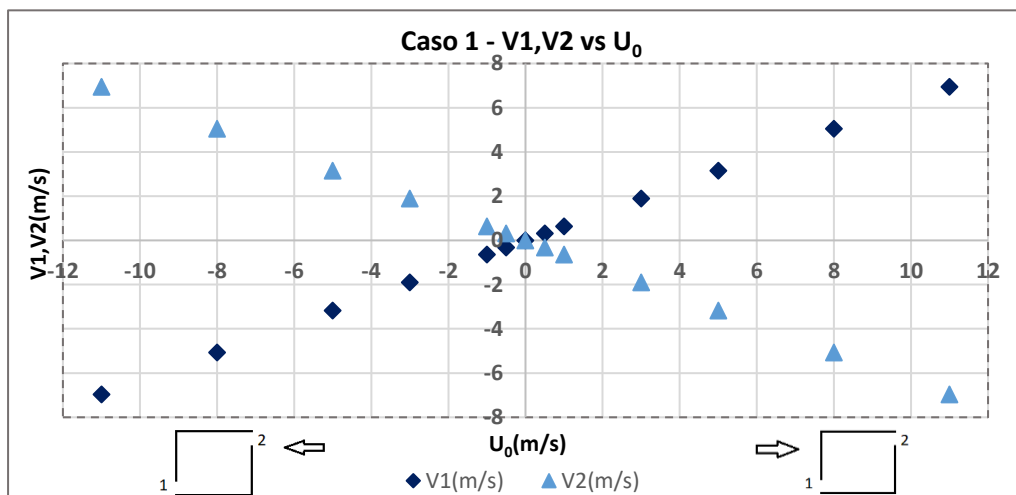


Figura 10 - Evolução da velocidade do ar nas aberturas ($V1$, $V2$) em função da velocidade do vento exterior (U_0)

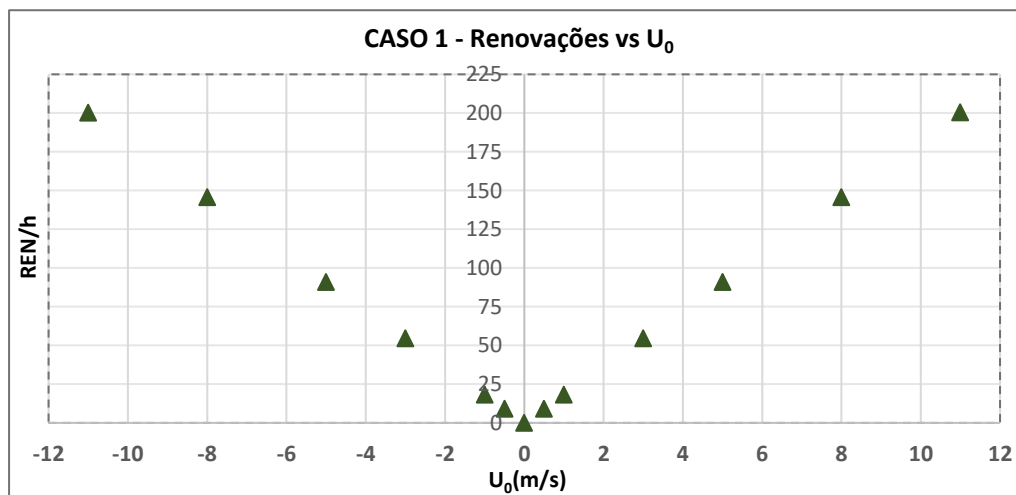


Figura 11 - Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior (U_0)

Os valores de $V1$ e $V2$ são a velocidade do ar à entrada/saída da abertura 1 e 2 respectivamente. Como seria de esperar estes valores são simétricos, devido à conservação da massa e a velocidade do ar nas aberturas evolui linearmente em relação à velocidade do vento exterior. Devido à inexistência de calor interior o número de renovações por

3.2. Caso 2 – Paredes adiabáticas com geração de calor.

hora do espaço é simétrico em relação à direção do vento, evoluindo também de forma linear.

3.2. Caso 2 – Paredes adiabáticas com geração de calor.

De seguida considerou-se para a mesma geometria do edifício, continuando com paredes adiabáticas, uma fonte de calor no interior com potência $Q = 3500 \text{ W}$. É de notar que se manteve restantes propriedades iguais.

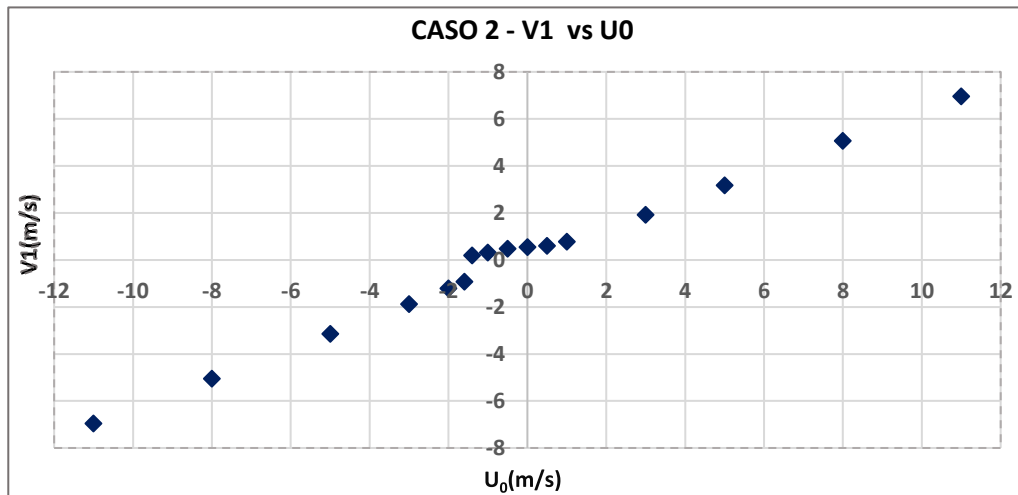


Figura 12-Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função da velocidade do vento exterior (U_0)

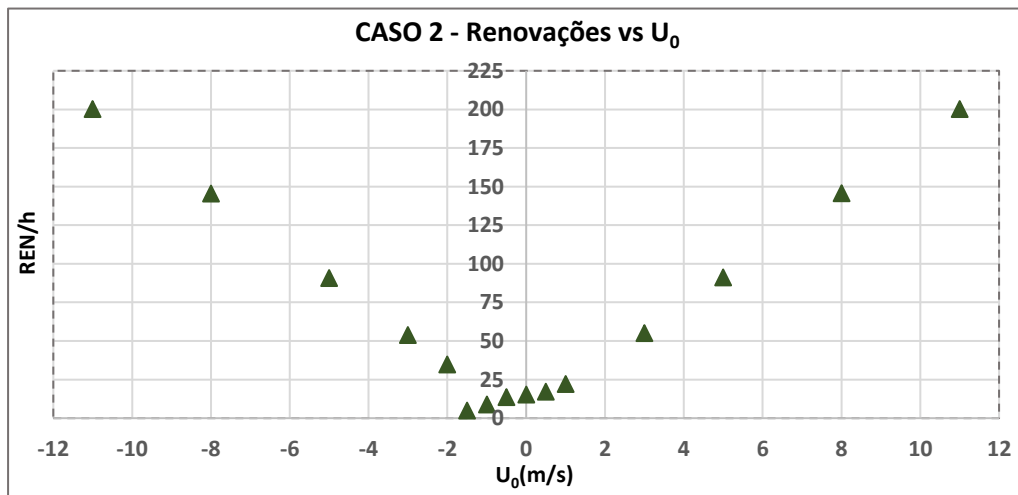


Figura 13-Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior (U_0)

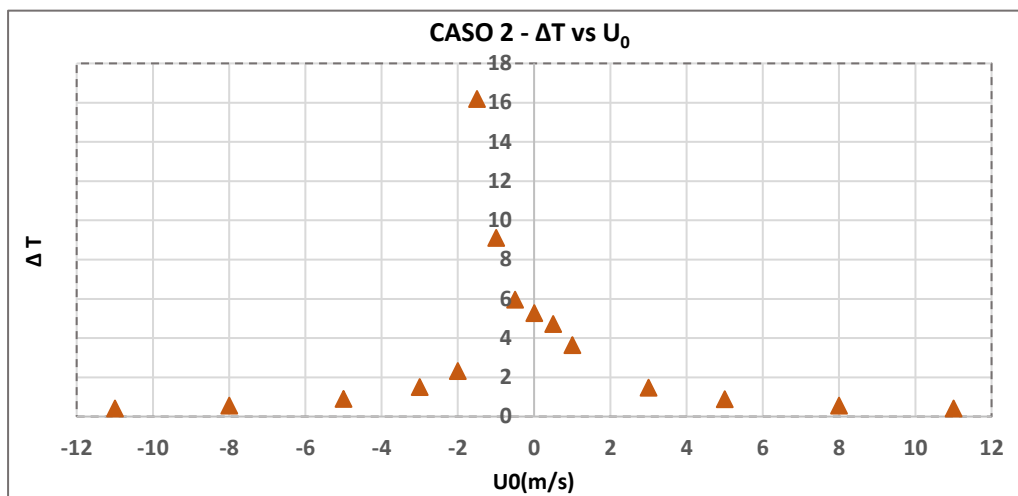


Figura 14-Variação da diferença de temperaturas entre a habitação e o exterior em função da velocidade do vento

Com este caso verifica-se o efeito da impulsão térmica, que se faz sentir com maior significância para valores de U_0 entre -1.5 m/s e $+1.5\text{ m/s}$. Quando o vento incide sobre a fachada do lado direito $U_0(-)$, a sua direção é contrária à da impulsão térmica, nota-se então que as velocidades nas aberturas se anulam devido a este efeito para valores próximos de $U_0 = -1.4\text{ m/s}$. Próximo deste valor o ar interior muda de sentido, devido à maior pressão que o vento exterior exerce entre as aberturas quando comparada à pressão exercida pela impulsão térmica. Neste ponto, verifica-se o valor mais baixo do número de renovações de ar e da velocidade de ar nas aberturas, 5 ren/h e $0,9\text{ m/s}$, respetivamente. Por esse motivo existe no mesmo ponto a variação da temperatura máxima, 16°C . De referir que se conseguisse encontrar o ponto de renovações de ar nulo (ou velocidade nas aberturas), ou seja, sem ventilação nos espaços, o programa não convergiria, pois, a diferença de calor no espaço seria infinita, devido à utilização de paredes adiabáticas.

3.3. Caso 3 – Paredes não adiabáticas com geração de calor.

Neste caso, considerou-se a mesma geometria e a mesma geração de calor, mas adicionou-se o coeficiente global de transmissão de calor (U) nas paredes laterais e teto, $0,48\text{ W/m}^2\text{C}$ e $0,75\text{ W/m}^2\text{C}$, respetivamente. Deste modo, as paredes da habitação não são adiabáticas.

3.3. Caso 3 – Paredes não adiabáticas com geração de calor.

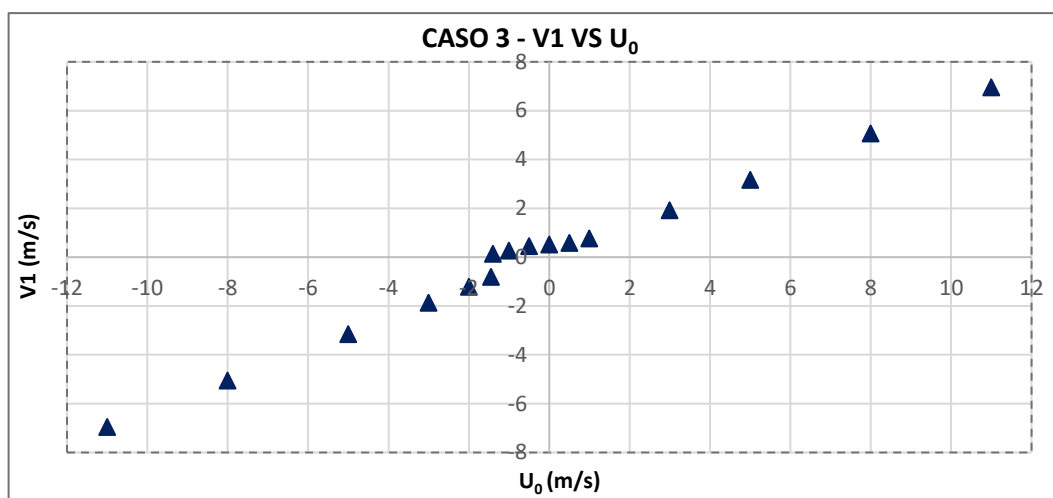


Figura 17-Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função do vento exterior, com geração de calor e paredes não adiabáticas

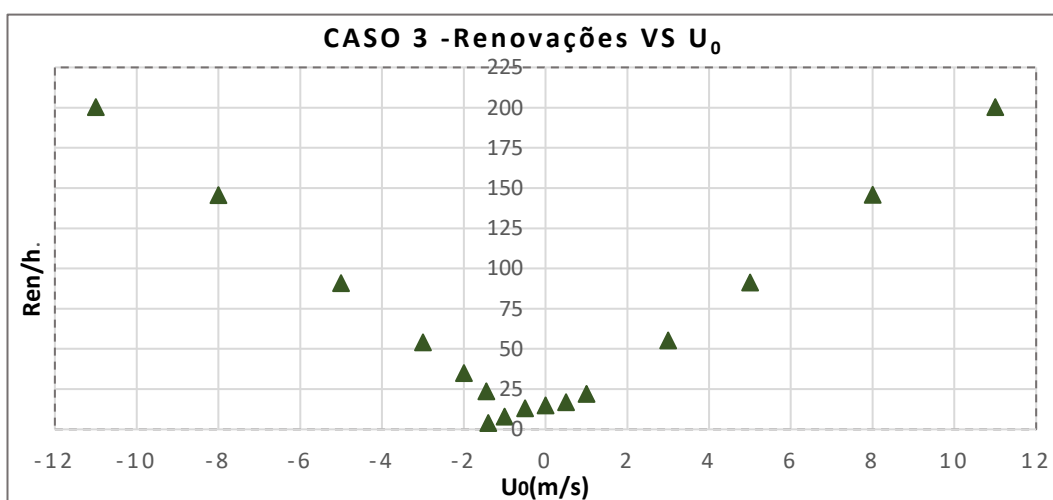


Figura 16-Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior(U_0), com geração de calor e paredes não adiabáticas

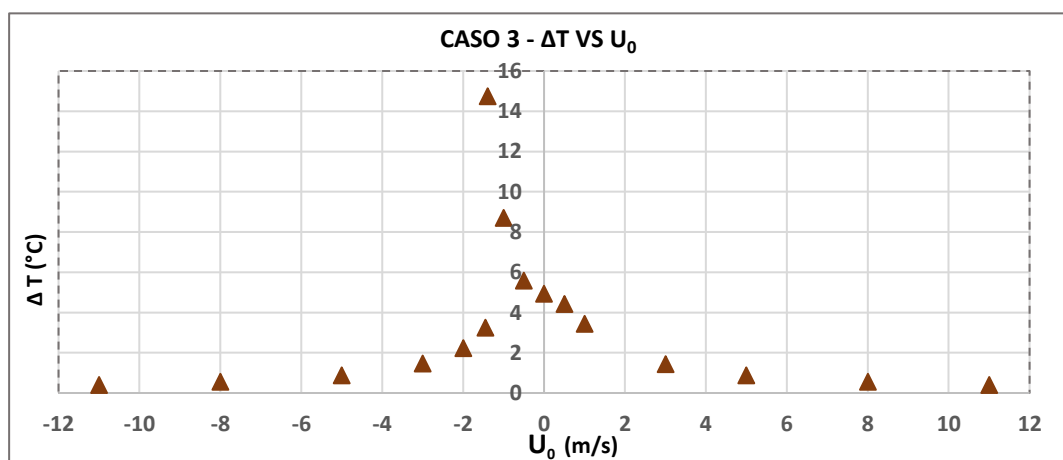


Figura 15-Variação da diferença de temperaturas entre a habitação e o exterior em função da velocidade do vento, com geração de calor e paredes não adiabáticas.

Com paredes não adiabáticas os resultados apenas diferem significativamente no calor envolvido no espaço, devido à dissipação de calor através das paredes, a diferença temperatura entre o exterior e o interior é menor do que no caso anterior (com paredes adiabáticas) ao longo da variação da intensidade e sentido do vento exterior.

3.4. Caso 4 – Aberturas na mesma fachada

Sucessivamente considerou-se um caso especial. Nomeadamente um edifício com a mesma geometria do anterior e com paredes adiabáticas. Possui, mas aberturas só de um lado, tem-se uma abertura vertical de $4 \times 1 \text{ m}^2$ na fachada do lado esquerdo do edifício e nenhuma do lado direito. Esta abertura é dada por quatro aberturas de $1 \times 1 \text{ m}^2$. Mais uma vez admitiu-se que todos os elementos de abertura possuem uma perda de carga $\varepsilon_k = 2,5$ e paredes não adiabáticas. Foi então inserida uma fonte de calor de 3500 W no interior do edifício para analisar o efeito da impulsão térmica. Se seguida apresenta-se a figura do espaço em estudo.

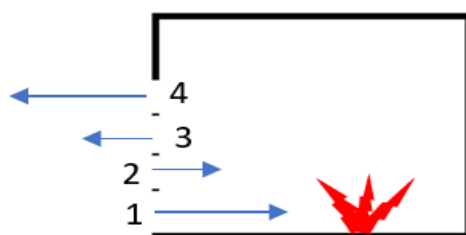


Figura 18-Illustração de habitação com 4 aberturas na mesma fachada

Os seguintes gráficos apresentam ao resultado da velocidade do ar nas aberturas em função do calor gerado (em KW) dentro do espaço, assim como o número de renovações por hora e a diferença de temperatura entre o exterior e o interior, também em função do calor gerado no interior. De notar que neste caso a velocidade do vento exterior não interfere com a ventilação do espaço devido às aberturas estarem na mesma fachada, então a ventilação depende apenas do valor da quantidade de calor libertado.

3.4. Caso 4 – Aberturas na mesma fachada

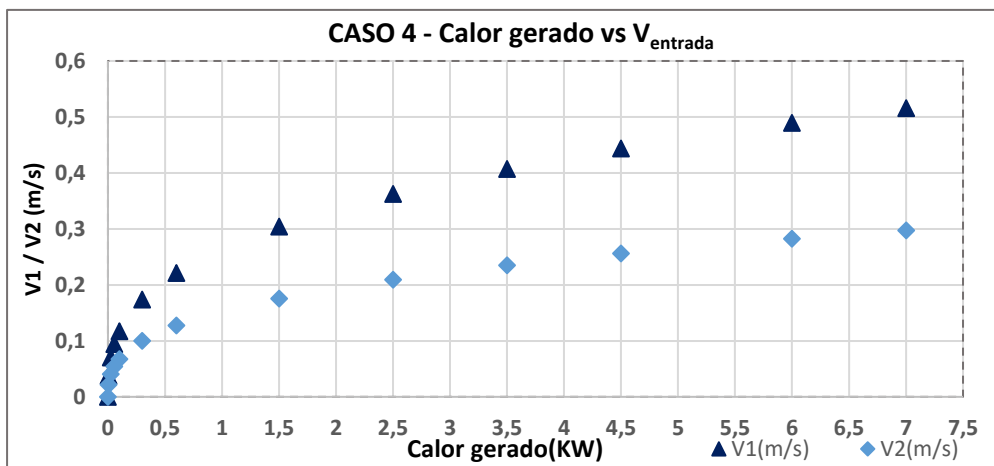


Figura 19-Evolução da velocidade nas aberturas 1 e 2 (inferiores) em função do calor gerado na habitação.

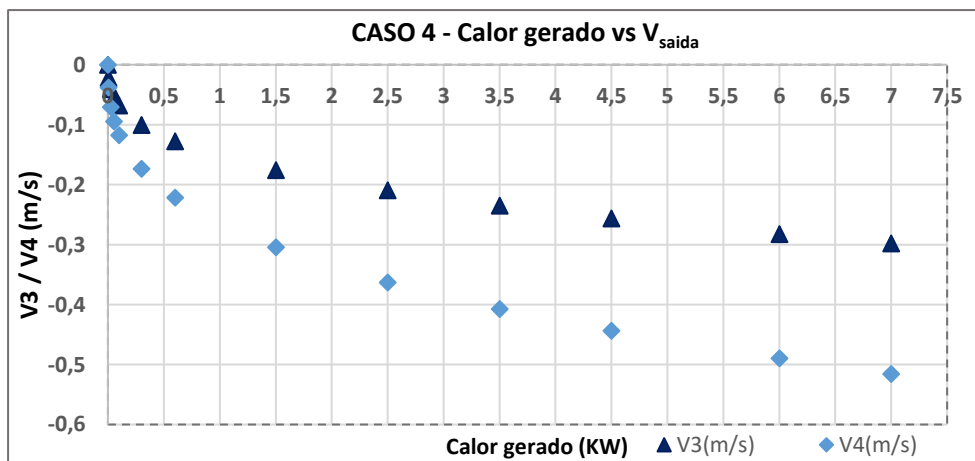


Figura 20-Evolução da velocidade nas aberturas 3 e 4 (superiores) em função do calor gerado na habitação

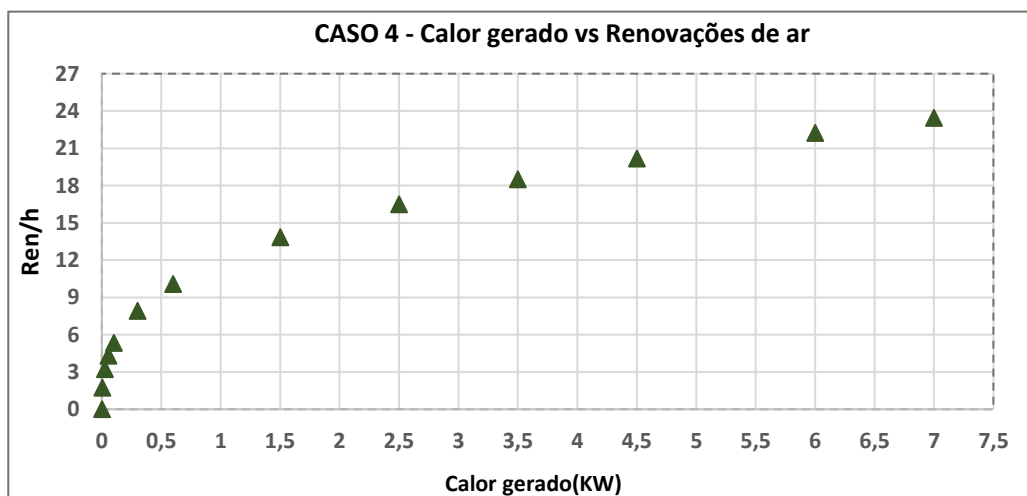


Figura 21- Evolução das renovações de ar por hora na habitação em função do calor gerado.

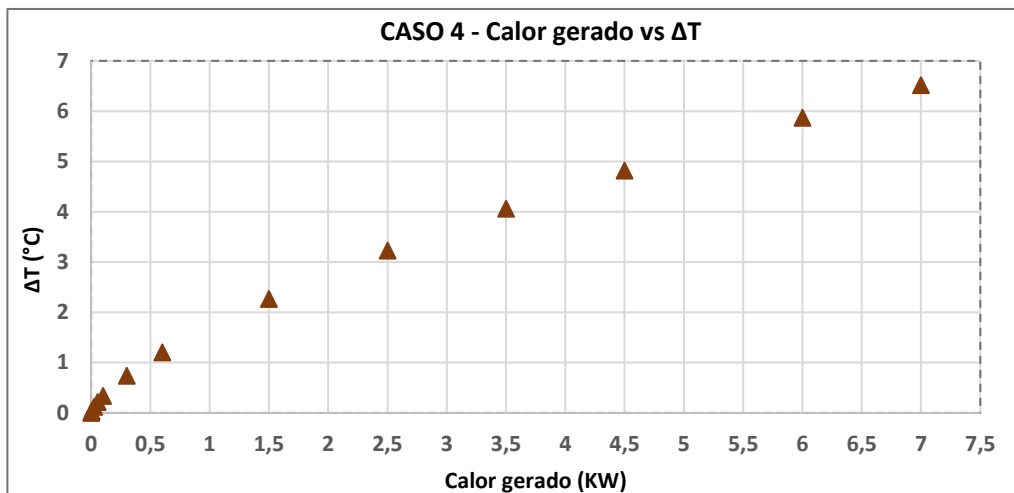


Figura 22- Evolução da diferença de temperatura entre a habitação e o exterior em função do calor gerado.

A partir dos primeiros dois gráficos anteriores verifica-se que o ar novo entra através das aberturas inferiores e o ar viciado sai através das aberturas superiores, o que permite ventilar o edifício sem contar com a velocidade do vento exterior. Este fenómeno acontece devido à impulsão térmica resultante da variação de densidade do ar aquecido no interior do edifício. Assim quanto maior for o calor gerado dentro do edifício maior será a velocidade do ar nas aberturas e o número de renovações de ar por hora, aumentando assim o nível de ventilação natural. O perfil dos pontos resultantes do número de renovações por hora é idêntico ao das velocidades nas aberturas, verificando-se por exemplo que com 300 W consegue-se atingir 7 renovações por hora, o ideal para um espaço com instalações sanitárias ou cantina [13]. Com 1500 W consegue-se atingir uma diferença de temperatura em relação ao exterior (15°C) de 2,2°C, ou seja, 17,2°C.

3.5. Caso 5 – Dois espaços com paredes adiabáticas e sem geração de calor

Neste subcapítulo do tutorial adiciona-se um espaço à habitação com a geometria apresentada na figura 23. Mantendo-se todas as aberturas com uma área 1x1 m² e coeficiente de perda de carga $\varepsilon_k = 2,5$. Primeiramente neste caso estuda-se a ventilação natural sem geração de calor e com paredes adiabáticas, apresentando-se os resultados em seguida. Primeiro o gráfico referente à evolução da velocidade do vento na abertura 1, e de seguida a evolução do nº de renovações por hora dos espaços, ambos em função da velocidade do vento exterior.

3.5. Caso 5 – Dois espaços com paredes adiabáticas e sem geração de calor

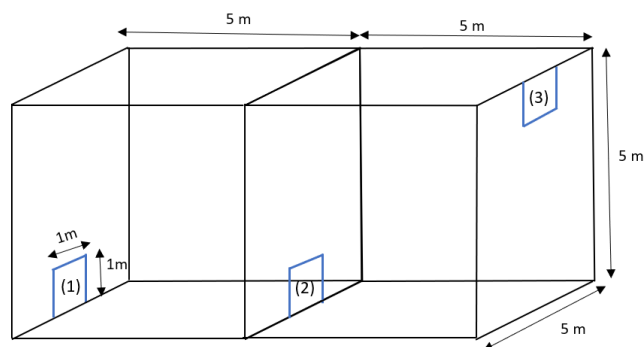


Figura 23 - Geometria do edifício para o estudo de casos com dois espaços

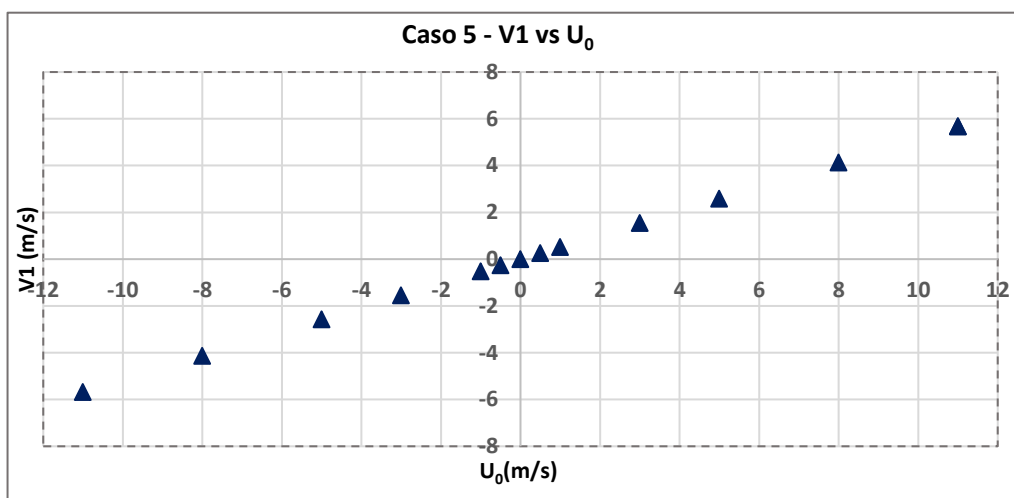


Figura 24 - Evolução da velocidade na entrada 1 em função do vento exterior

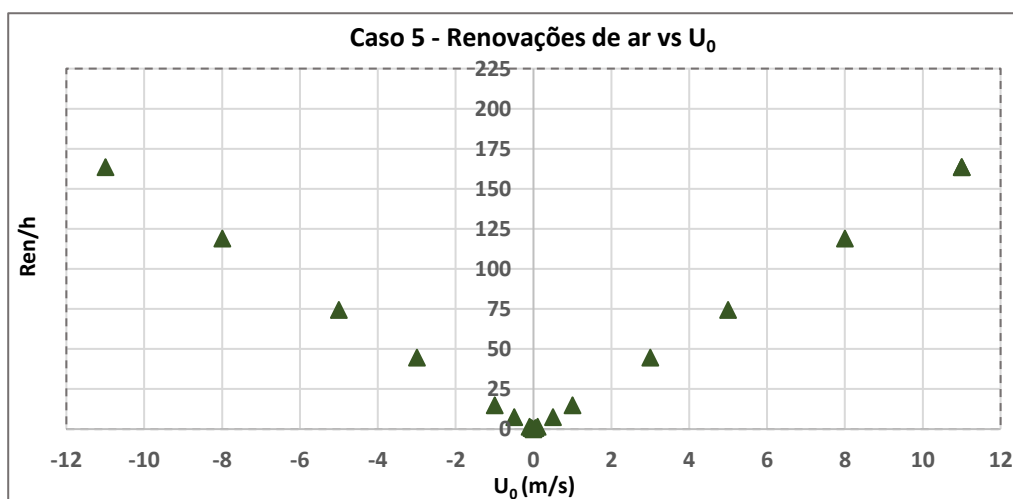


Figura 25- Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior

Como seria de esperar neste caso, obtém-se uma evolução da velocidade do ar na abertura 1 linear em toda a gama de valores da velocidade do vento, tal como no caso 3.1.

Sabe-se também, devido à conservação da massa nos dois espaços, que a velocidade na abertura 2 e 3 têm resultados idênticos à abertura 1. Também a evolução número de renovações por hora, devido ao mesmo motivo é idêntica em ambos os espaços, e também com crescimento linear em toda a gama de valores da velocidade do vento.

3.6. Dois espaços com paredes adiabáticas e com geração de calor

De seguida estuda-se o mesmo caso anterior, mas com geração de calor (3500W) no espaço da direita.

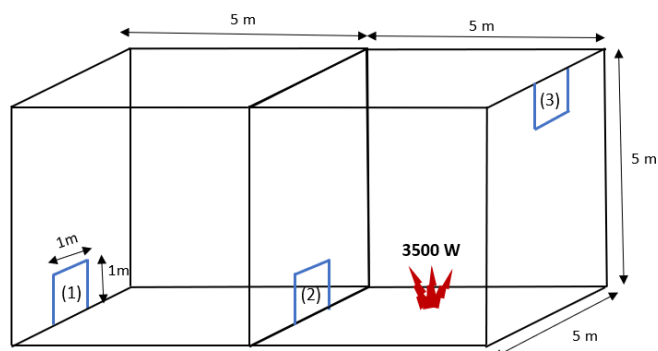


Figura 26- Ilustração da habitação com dois espaços internos e geração de calor no espaço da direita

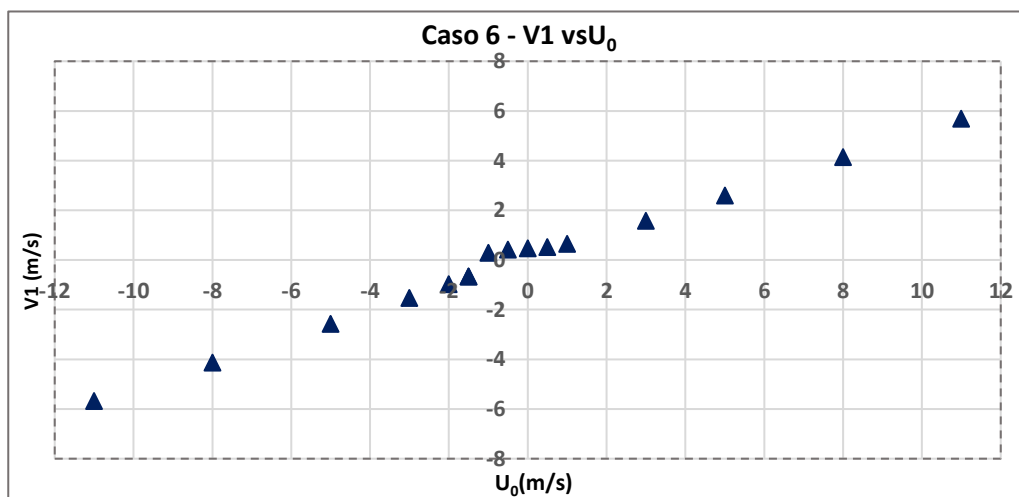


Figura 27- Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função do vento exterior, com geração de calor no espaço da direita.

3.6. Dois espaços com paredes adiabáticas e com geração de calor

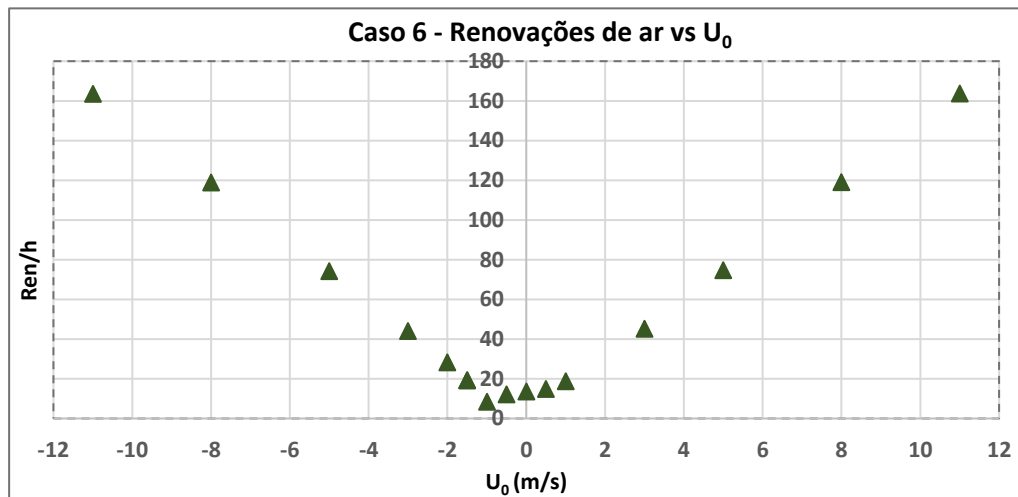


Figura 28- Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior, com geração de calor no espaço da direita

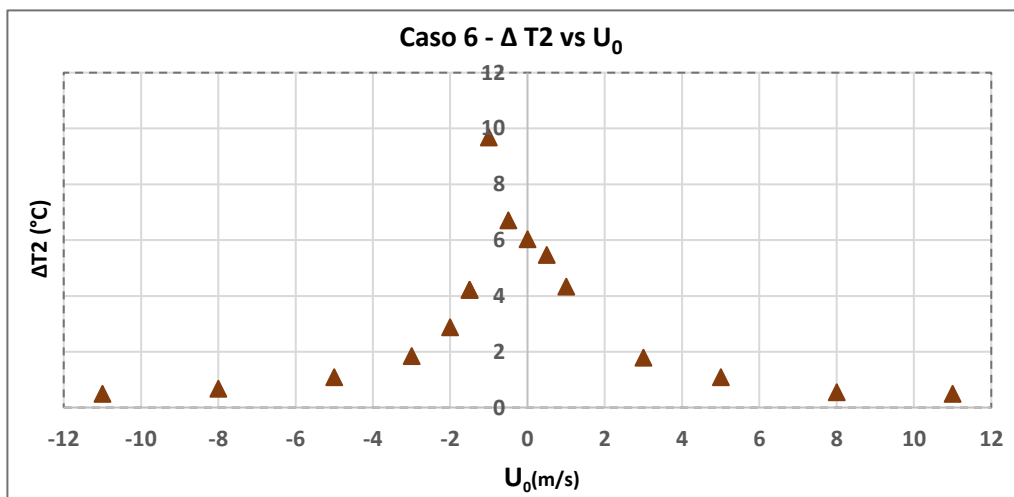


Figura 29 Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da esquerda o e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor no espaço da direita.

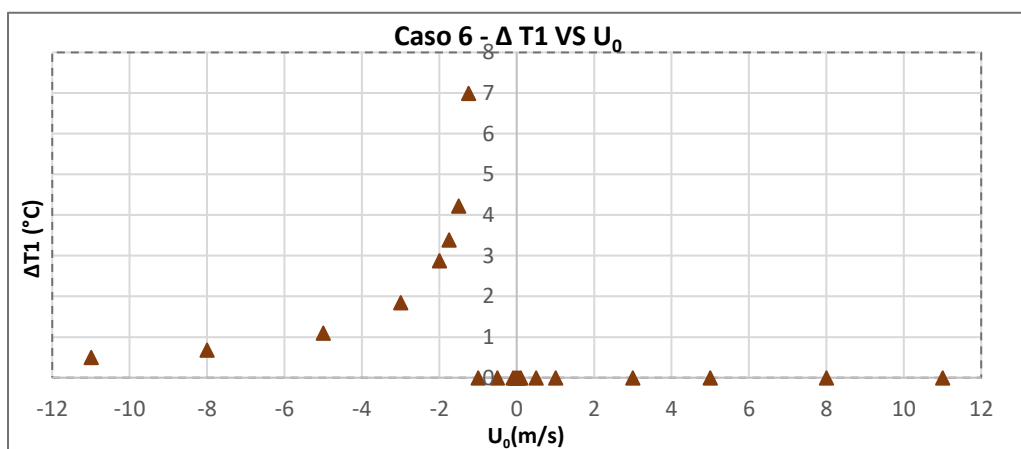


Figura 29- Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da direita o e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor no espaço da direita.

Estes dois últimos casos mostram novamente o efeito da impulsão térmica. Neste último pode-se concluir que a habitação esquerda apenas é contaminada com ar da habitação da direita (aquecida) depois de atingir 1,4 m/s com sentido do vento da esquerda para a direita, neste valor a impulsão térmica anula-se. Neste ponto, atinge-se a mais baixa taxa de ventilação, com $V1=0,29$ m/s e 6 ren/h, e é possível atingir um aumento de 10°C devido à libertação de 3500 W de calor do espaço da direita. De referir novamente que este ponto de diferença de temperatura é aproximado da taxa de ventilação nula. Não sendo possível obter o ponto exato que anula a ventilação, pois com paredes adiabáticas este ponto seria infinito.

3.7. Dois espaços e uma chaminé, todos com paredes adiabáticas e fonte de calor.

Na seguinte figura está representada a geometria anterior estudada, mas com o adicionamento de uma chaminé com duas aberturas (3) e (4) com área igual às restantes aberturas $1 \times 1 \text{ m}^2$ colocada no espaço à direita. A chaminé tem seção quadrangular e uma altura de 5m. Para a abertura 1 os parâmetros, coeficientes de pressão, coeficientes de perda de carga mantêm-se $+1/-1$ e 2.5 respetivamente. Já para a chaminé considera-se um coeficiente de pressão de $-1,15$, de acordo com as equações do capítulo anterior. Existe a mesma fonte de calor no espaço da direita com 3500W.

Novamente, faz-se variar a velocidade do vento entre $[-11; +11]$ m/s e obtêm-se os gráficos referentes à velocidade nas aberturas, renovações por hora e diferenças de temperatura entre o interior e o exterior do espaço (ΔT).

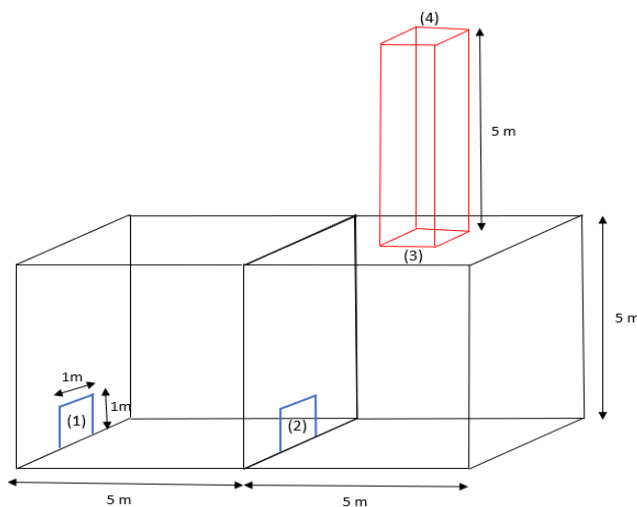


Figura 30-Geometria de uma habitação com dois espaços e uma chaminé

3.7. Dois espaços e uma chaminé, todos com paredes adiabáticas e fonte de calor.

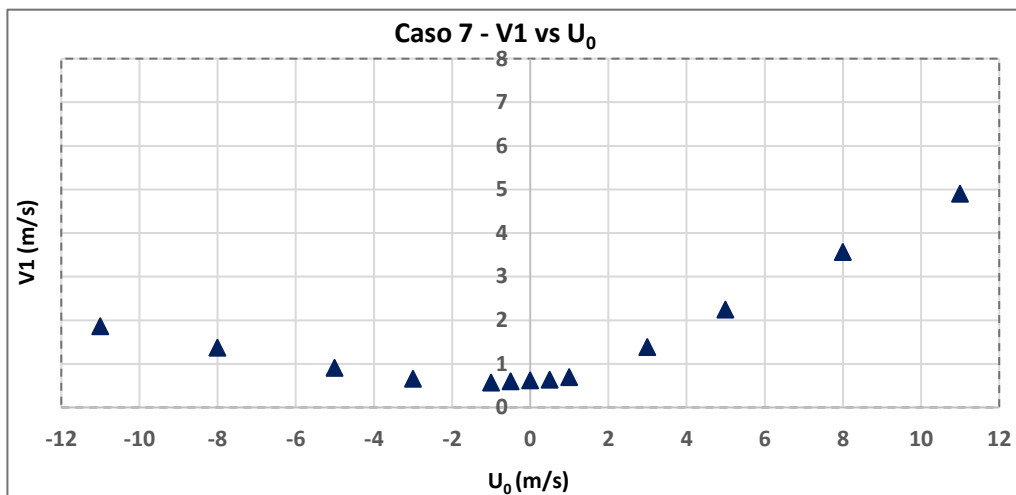


Figura 31-Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita.

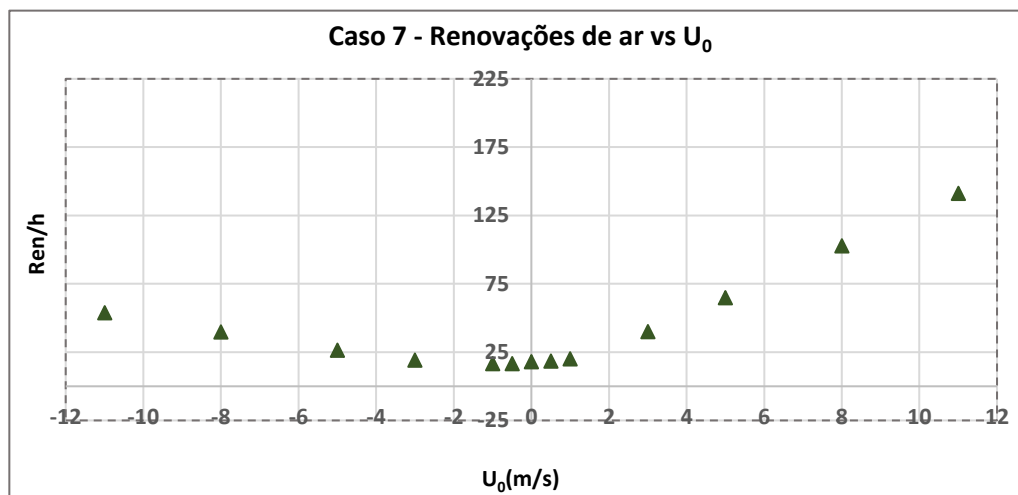


Figura 32- Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da direita o e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita

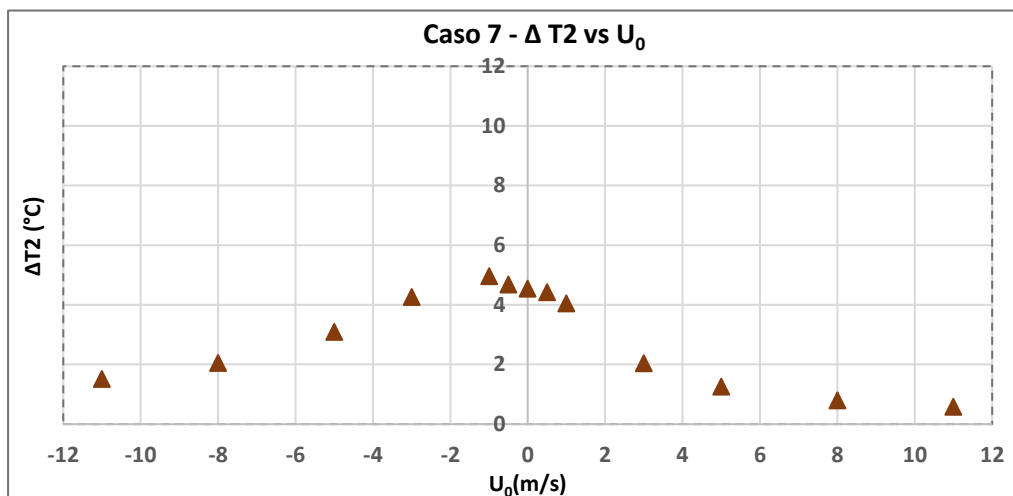


Figura 33 Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da direita e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita.

Conclui-se com este caso que com a utilização da chaminé o fluxo de ar do edifício tem apenas um sentido, da esquerda para a direita, mesmo com o vento em sentido contrário. Este fenómeno deve-se à baixa pressão criada no topo da chaminé, que é tanto menor quanto maior for a velocidade do vento exterior. Assim se existir ar contaminado que seja indesejado dentro do edifício à sua direita (fornecido por uma fábrica, por exemplo) consegue-se evitar que este entre nas habitações.

3.8. Dois espaços e uma chaminé, todos com paredes não adiabáticas e fonte de calor.

3.8. Dois espaços e uma chaminé, todos com paredes não adiabáticas e fonte de calor.

De seguida mostram-se os resultados para o mesmo caso anterior, mas com paredes e teto não adiabáticos, ou seja, adiciona-se um coeficiente global de transmissão de calor (U) nas paredes laterais de ambos os espaços e chaminé e no teto. Para as paredes laterais do edifício $U = 0,48 \text{ W/m}^2\text{°C}$; para o teto $U = 0,78 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e para as paredes laterais da chaminé $U = 1,15 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

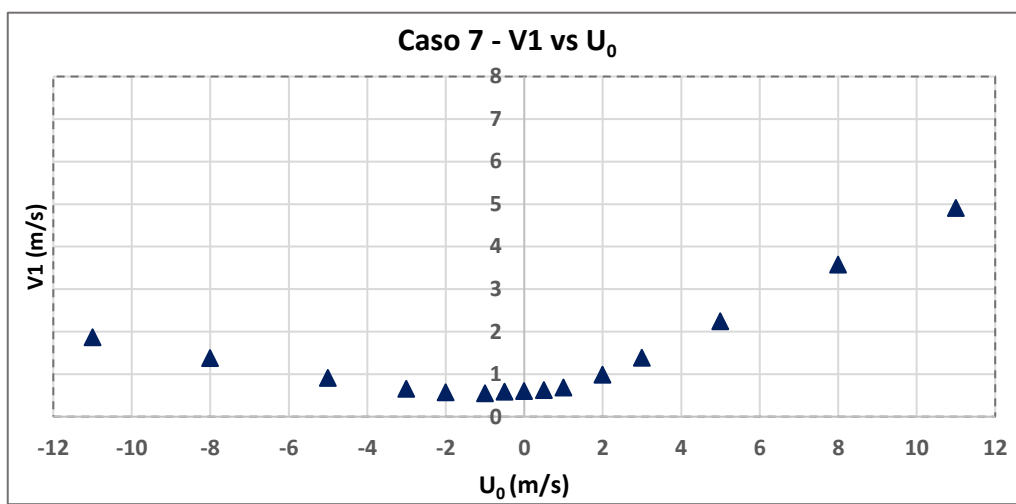


Figura 35: Evolução da velocidade do ar na abertura 1 em função do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita e paredes não adiabáticas.

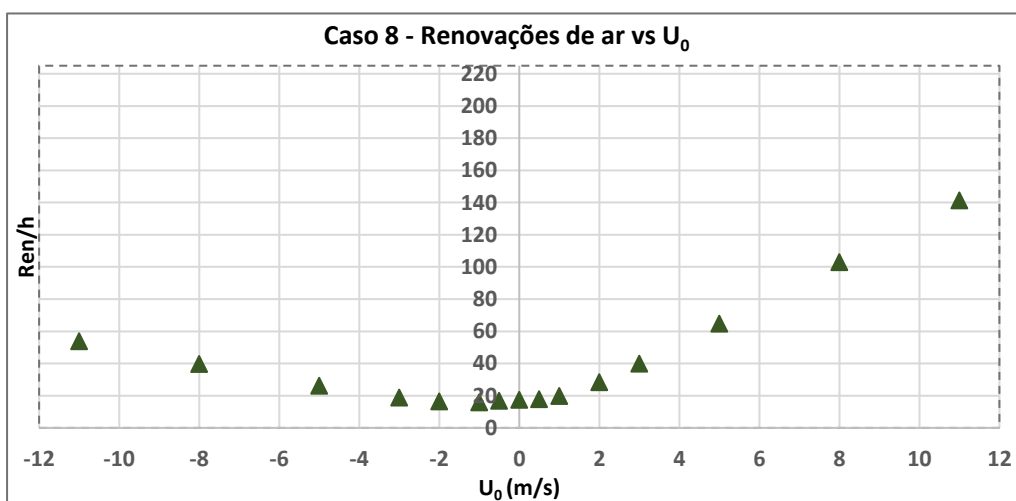


Figura 34 - Variação das renovações de ar por hora em função do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita e paredes não adiabáticas.

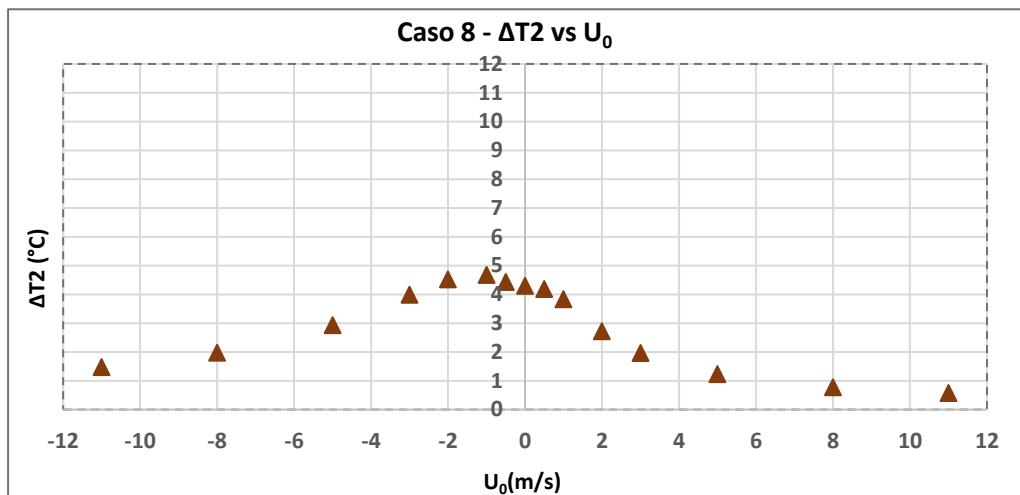


Figura 36 - Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da direita e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita e paredes não adiabáticas.

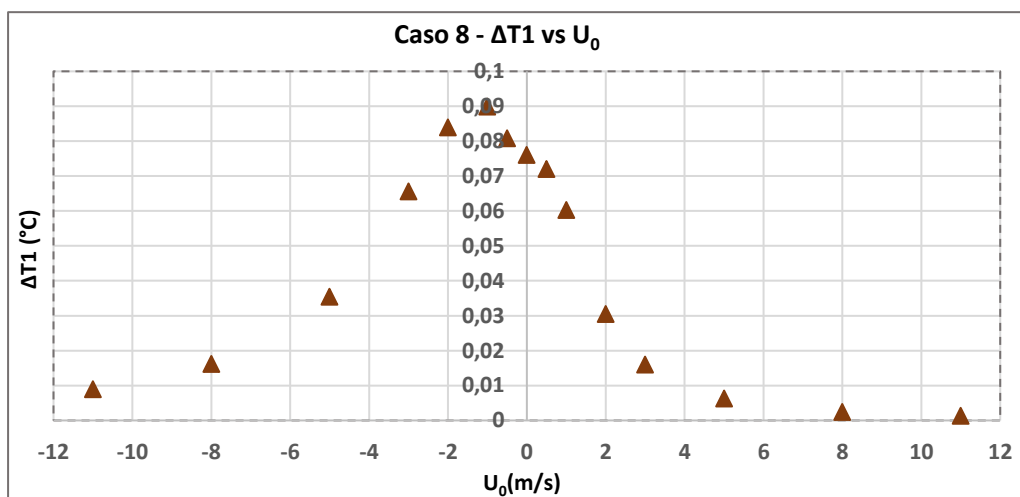


Figura 37 - Evolução da diferença de temperatura entre o espaço da esquerda e o exterior em função da velocidade do vento exterior, com geração de calor e chaminé no espaço da direita e paredes não adiabáticas

Neste caso, objetivo é verificar o efeito das paredes não adiabáticas ao longo da mesma gama de valores da velocidade do vento exterior. Estas paredes que permitem a transmissão do calor é a única diferença entre os dois últimos casos. Neste último caso, com paredes adiabáticas, existe diferença de temperatura no espaço da esquerda (ΔT_1) pois apesar da geração de calor estar no espaço da direita e o fluxo de ar circular da esquerda para a direita existe transferência de calor através da parede que divide estes dois espaços. Devido ao mesmo efeito com o exterior, existe neste caso uma pequena diminuição da diferença de temperatura (em relação ao exterior) quando comparado com o caso anterior.

3.7. Ventilação mecânica

A ventilação mecânica à base de ventiladores no âmbito da ventilação natural é utilizada para insuflar ou retirar o ar na habitação quando o vento exterior não tem intensidade suficiente para satisfazer o número de renovações por hora necessárias.

Neste subcapítulo vai ser considerado um edifício igual ao do caso 3.5 onde primeiramente será colocado um ventilador na abertura intermédia (2) a insuflar a habitação da direita, ou seja, serve como exaustor na habitação da esquerda, como indicado na seguinte figura.

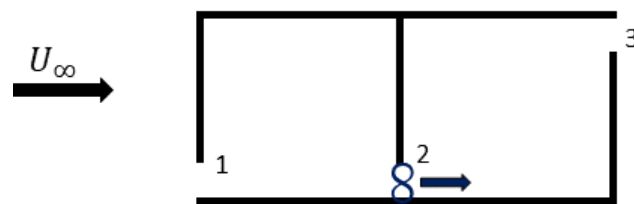


Figura 38 - Ventilador a favor do sentido do vento exterior

3.7.1. Escolha e dimensionamento do ventilador

A escolha e dimensionamento do ventilador neste subcapítulo tem em conta o caso de estudo deste trabalho, ou seja, é este o ventilador utilizado no caso de estudo nos capítulos 5, 6, 7 e 8. Primeiramente é utilizado neste capítulo de forma a estudar o seu funcionamento, num edifício de geometria simples.

Para a modelação do ventilador escolheu-se o modelo *AW SILEO EC* da marca *SystemAir* com o catálogo e características em anexo A. O ventilador tem diâmetro 1063 mm e uma área varrida de 0,887 m² [14].

Capítulo 3 - Casos Tutoriais

A curva 7 do gráfico seguinte corresponde ao ventilador escolhido a uma velocidade de rotação de 969 rpm.

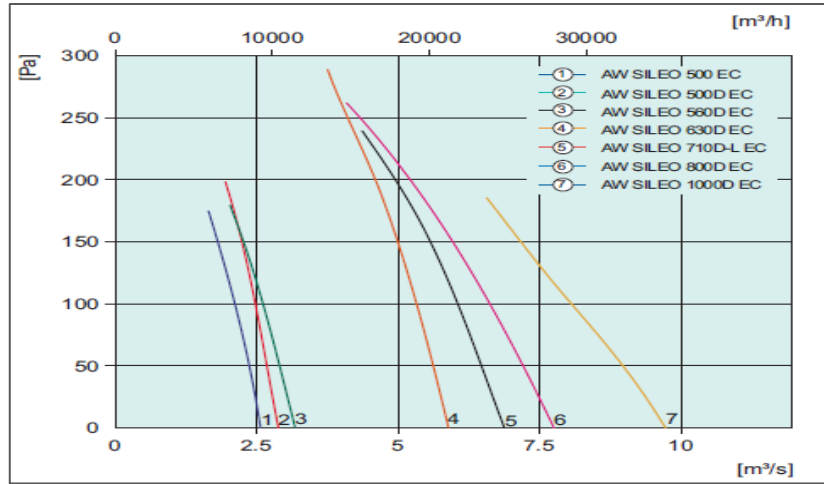


Figura 39 - Curvas do ventilador AW SILEO EC [14]

Fez-se uma interpolação para um polinómio de grau 2 utilizando dois pontos desta curva e obteve-se a seguinte equação:

$$P = -1,37Q^2 - 31,45Q + 441,90 \quad (17)$$

Como $Q = v \times A$:

$$P = -1,37(v \times 0,887)^2 - 31,45(v \times 0,887) + 441,90 \quad (18)$$

Obtém-se assim a seguinte equação para a curva do ventilador:

$$P = -1,08v^2 - 27,50v + 441,90 \quad (19)$$

Para adimensionalizar a curva no ventilador é necessário recorrer à teoria de semelhança de turbomáquinas [12], dada pelas seguintes relações:

Relação adimensional para o coeficiente de altura:

$$\frac{gH_1}{\omega_1^2 D^2} = \frac{gH_2}{\omega_2^2 D^2} \Leftrightarrow H_2 = H_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 \Leftrightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 \quad (20)$$

Relação adimensional para o coeficiente de caudal:

$$\frac{Q_{V_1}}{\omega_1 D^3} = \frac{Q_{V_2}}{\omega_2 D^3} \Leftrightarrow Q_{V_2} = Q_{V_1} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right) \Leftrightarrow v_2 = v_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right) \quad (21)$$

ω_1 corresponde à velocidade de rotação que se pretende e ω_2 à de referência, que neste caso é 969 rpm.

Substituindo na equação X as relações X e X, obtém-se a curva adimensionalizada do ventilador:

$$P\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 = -1,08\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}v\right)^2 - 27,50\frac{\omega_2}{\omega_1}v + 441,90 \quad (22)$$

Simplificando:

$$P = -1,08v^2 - 27,50\frac{\omega_1}{\omega_2}v + 441,90\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \quad (23)$$

De seguida, no seguinte gráfico, mostra-se as interpolações do ventilador para algumas velocidades de rotação (ω_2) em função da velocidade do ar na abertura do ventilador.

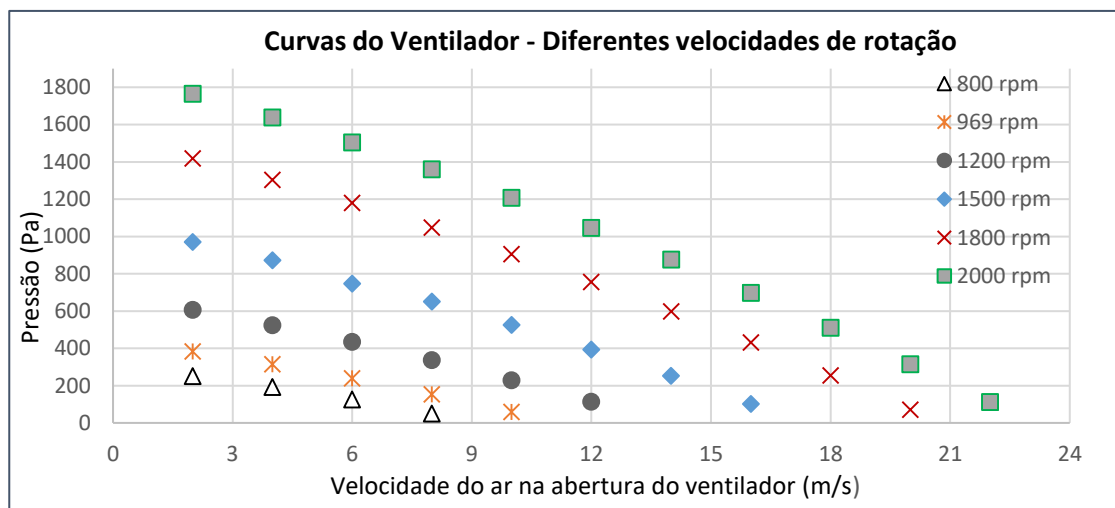


Figura 40 - Curvas do ventilador a diferentes velocidades de rotação

Utiliza-se este ventilador para estudar este caso de geometria simples apresentado anteriormente na figura 38 com o objetivo de perceber como manipular a área das aberturas em função da velocidade do vento exterior e da velocidade de rotação do ventilador.

Admitindo um nº de renovações por hora nos espaços de 70, um número bastante elevado devido ao volume reduzido dos espaços e que permite uma boa observação dos resultados (por normal numa habitação residencial o nº de renovações por hora costuma ser entre 1 e 2). O objetivo continua a ser manter esse número de renovações sempre constante, para isso enquanto a intensidade do vento não consegue satisfazer este número

o ventilador diminui (ou aumenta) a sua velocidade de rotação à medida que aumenta (ou diminui) a intensidade do vento exterior. O ventilador deixa de ser necessário quando o vento exterior atinge uma velocidade critica (U_{Crit}). Neste ponto o vento exterior consegue 70 renovações por hora dos espaços. Quando o vento aumenta ainda mais a sua intensidade é necessário diminuir as áreas das aberturas de modo a manter este número de renovações.

Começando com uma velocidade de rotação para este ventilador de 210rot/min (valor que satisfaz as renovações p/h sem vento exterior), obteve-se uma leitura de resultados ilustrada no gráfico seguinte para a direção do vento da esquerda para a direita (a favor do ventilador).

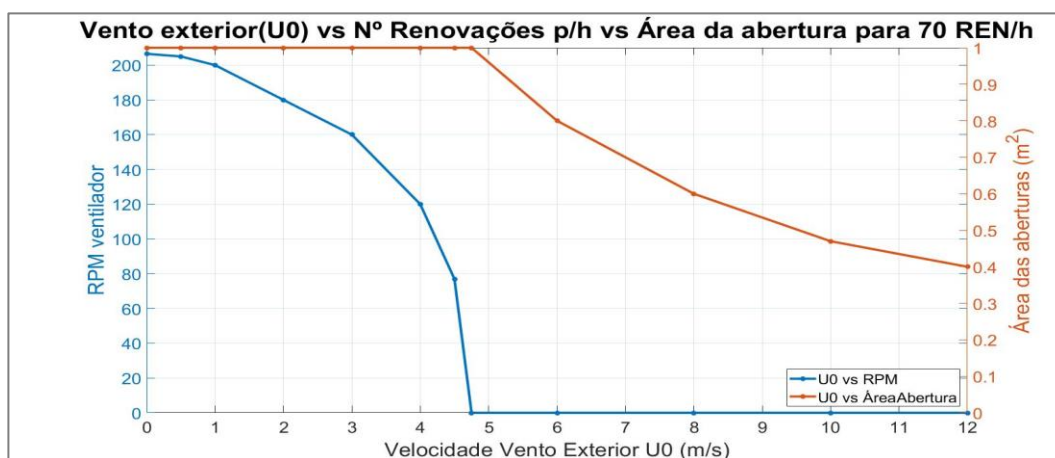


Figura 41 - Funcionamento do ventilador/ Área das aberturas em função da velocidade do

Constata-se que o $U_{\text{Crit}} = 4,75$ m/s, assim de 0 m/s até 4,75 as áreas das aberturas permaneceram inalteradas com $1m^2$ enquanto a rotação do ventilador sofreu um decréscimo de 210 rpm até 0 rpm de forma parabólica. Assim como as áreas das aberturas depois deste valor critico, que diminui de $1m^2$ até $0,42m^2$ quando a velocidade do vento atinge 12 m/s.

Por vezes o vento muda de sentido e o pretendido é que o sentido do ar dentro dos espaços não se altere. Neste caso, é essencial o uso de ventiladores, levando então ao estudo do caso em que o sentido do vento é da direita para a esquerda e o ventilador continua a insuflar o espaço da direita, como ilustrado na figura seguinte. O gráfico em baixo mostra os resultados para este caso.

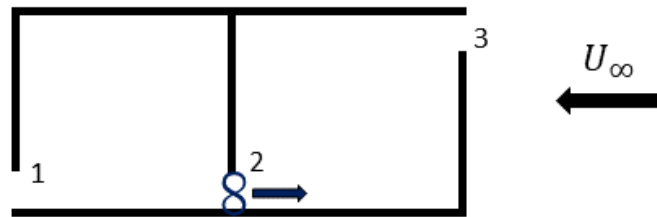


Figura 42 - Ventilador contra o sentido do vento exterior

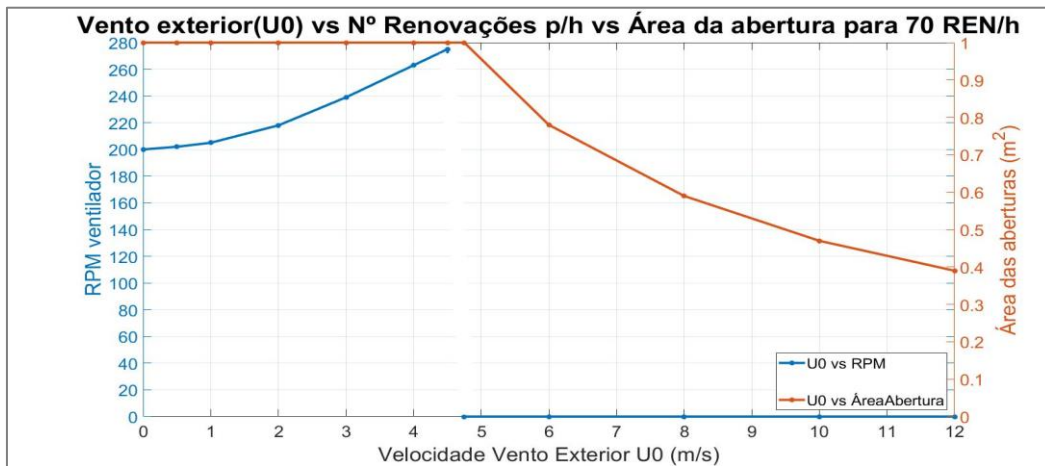


Figura 43- Funcionamento do ventilador/ Área das aberturas em função da velocidade do

Neste caso verifica-se o contrário do que acontece no caso anterior. Quando a intensidade do vento aumenta, aumenta também a velocidade de rotação do ventilador de forma a vencer essa força dada pelo vento exterior. Assim o escoamento dentro do edifício continua a ser da esquerda para a direita. Obtém-se assim uma velocidade de rotação máxima de 278 rpm, sendo que apartir deste ponto critico ($U_{Cr\ i} = 4,75 \text{ m/s}$) o ventilador desliga-se e começa a diminuir as áreas das aberturas à medida que aumenta o vento exterior, de modo idêntico ao caso anterior.

É de salientar que é sempre utilizado um coeficiente de perda de carga para as aberturas de 2.5, este coeficiente é muito utilizado e aceite para trabalhos deste tipo [11]. Assim ao longo de toda a dissertação é utilizado este valor.

Capítulo 4. Chaminé Térmica

Neste capítulo apresenta-se um modelo para o cálculo do calor libertado por uma parede quando está sujeita a um aquecimento por radiação solar. Tem-se como objetivo nesta secção procurar conhecer os valores do calor que é libertado por uma parede ao longo do dia para um espaço entre a própria parede e um envidraçado. Posteriormente com estes resultados, no caso de estudo, pretende-se aproveitar o calor no espaço entre a parede e o envidraçado para ventilar naturalmente este calor para o interior da habitação. Apesar de ao longo desta dissertação o modelo designar-se por chaminé térmica ou coletor solar térmico (ou apenas coletor solar), este não deve ser confundido com os convencionais coletores térmicos de aquecimento de água utilizados maioritariamente em residências.

4.1. Inércia térmica

A inércia térmica é a capacidade de um elemento armazenar calor e libertá-lo ao fim de certo tempo. Esta capacidade pode ser utilizada nos edifícios para absorver os ganhos de calor durante o dia, reduzindo assim a carga de arrefecimento, e libertar este calor à noite, reduzindo assim a carga de aquecimento. A capacidade que um elemento tem em armazenar calor depende da sua massa, do calor específico e também da condutibilidade térmica [15].

Na figura seguinte mostra-se a evolução da temperatura no interior de uma parede ao longo do dia num clima temperado com amplitude térmica diária importante.

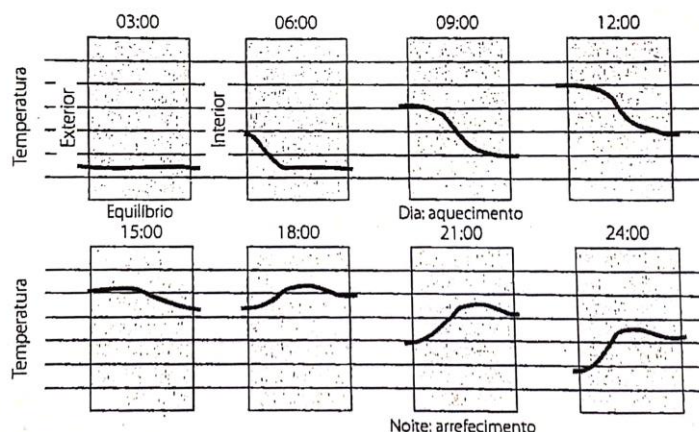


Figura 44 - Perfis de temperatura de uma parede pesada ($>750\text{kg/m}^2$) ao longo de um dia [13] .

No início do dia, sob a ação combinada da temperatura e da radiação solar, o paramento exterior sofre uma subida de temperatura relativamente às outras secções da parede, originando-se uma onda de calor que se propaga em direção ao paramento interior, que está a uma temperatura menor. A velocidade à qual se processa esta transmissão do calor depende da massa das sucessivas camadas de parede que a onda de calor encontra no seu caminho e da respetiva condutibilidade térmica. Neste processo, mostrado na figura anterior, as camadas de parede, em função da sua massa e do seu calor específico, vão subtraindo calor à onda que as atravessa. O calor retido por cada camada de material vai primeiramente elevar a sua temperatura e só mais tarde é retransmitido para as camadas adjacentes. Daqui resulta um desfasamento temporal da onda de calor relativamente à situação de uma parede sem massa térmica [13].

A seguinte figura ilustra o problema a ser estudado, relembrando que interessa calcular o calor que fica armazenado no espaço entre a parede e o envidraçado.

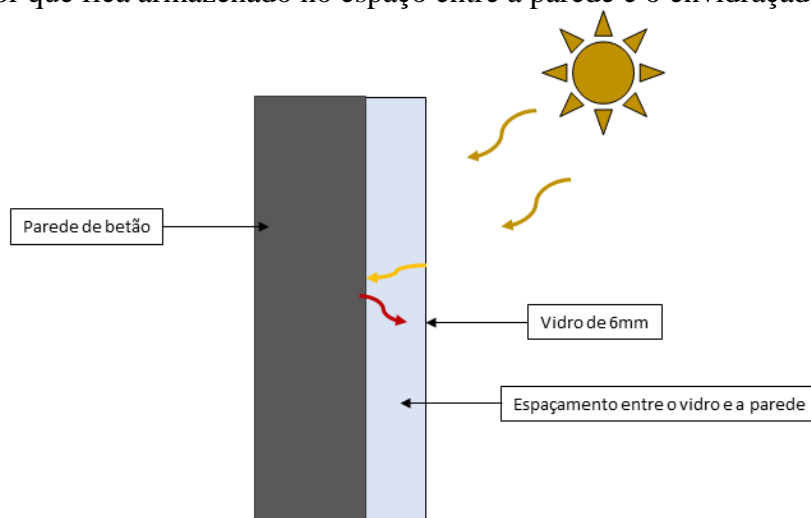


Figura 45 - Ilustração do modelo a estudar

Sabe-se que a radiação proveniente do sol ultrapassa facilmente o vidro (transmissibilidade (e) = 0,97), mas a radiação emitida pela parede tem muita dificuldade em sair (e = 0,001), criando assim um “efeito de estufa” no espaçamento entre o vidro e a parede [16].

É também de salientar que a absorvidade (α) do ar é aproximadamente zero, então o ar é apenas aquecido quando um material absorve calor e por sua vez emite para este uma parte do calor por convecção.

Posto isto, criou-se um modelo para determinar a calor libertado pela parede com a ajuda do livro da companhia *Carrier* [17], onde é possível consultar resultados experimentais tabelados. Em seguida apresentam-se os resultados mais importantes para este estudo:

- Aportações solares através do vidro (I) consoante a orientação, mês e latitude (W/m^2). Anexo B. [17].
- Fatores de inercia térmica (f). Estes valores indicam o fator do calor libertado pela parede consoante o peso, hora solar e orientação. Anexo C [17].
- Fator total de ganho solar (F_{gs}) através do vidro consoante o tipo e espessura do vidro. Anexo D [17].

Para se obter o calor libertado pela parede devido à insulação é necessário multiplicar estes três valores retirados das tabelas em anexo (B, C e D) pela área exposta aos raios solares [17], obtendo-se assim a seguinte equação para o calor libertado (Q_P).

$$Q_P = I \times f \times F_{GS} \times A \quad (24)$$

Pode-se também adicionar nesta equação um fator de correção inerente aos sombreamentos.

A equação anterior é utilizada para determinar a carga real de refrigeração devido aos ganhos solares quando a temperatura do espaço envolvente se mantém constante, por isso como se pode verificar na tabela no anexo C, os coeficientes de inercia térmica são dados para temperatura interior constante, o que não acontece neste tipo de caso em estudo. Assim pode-se dizer que este resultado é uma aproximação do que aconteceria na realidade.

4.2 Caso experimental – Modelo coletor térmico

Para averiguar resultados com este modelo construíram-se dois casos simples, um para o verão e outro para o inverno. No inverno é necessário aquecer o espaço através da insulação solar, fazendo ventilar o espaçamento de ar aquecido para dentro da habitação. Já no verão quer-se arrefecer o ar dentro do espaço, mudando as cotas das aberturas pode-se utilizar este modelo para obter maior taxa de ventilação no espaço através impulsão térmica que existe no espaçamento aquecido, funcionando assim como uma chaminé solar. Para melhor visualização destes dois casos, tem-se as seguintes figuras.

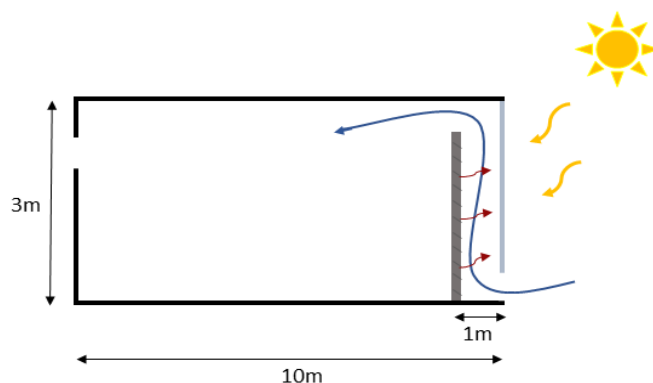


Figura 46 - Caso parede de inercia térmica - In-

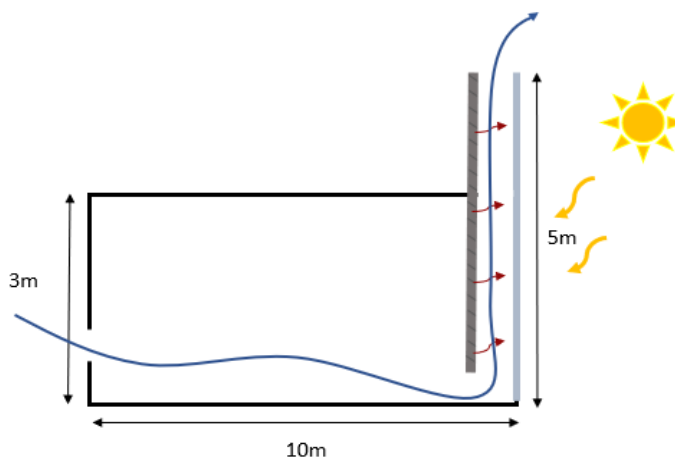


Figura 47 - Caso parede inercia térmica - Verão

Em ambos os casos existem dois espaços, o espaço habitável à esquerda, com dimensões $10 \times 7 \times 3 \text{ m}^3$, que perfaz um volume de 210 m^3 , com uma área em planta de 70 m^2 . E um espaço à direita, separado por uma parede que para este caso é considerada infinita (ou totalmente adiabática), que contem o espaçamento de ar a ser aquecido através da radiação solar que atravessa o envidraçado (a azul), com dimensões $7 \times 3 \times 1 \text{ m}^3$. No

4.2 Caso experimental – Modelo coletor térmico

caso do verão acrescenta-se ainda uma chaminé com 2 metros de altura no coletor solar. A chaminé neste caso vai servir para obter mais renovações por hora na habitação de ar exterior (mais fresco) como foi demonstrado anteriormente. As aberturas têm todas 1 m^2 e uma perda de carga $\varepsilon_k = 2,5$. A parede do coletor solar tem em ambos os casos uma área de $7 \times 3 \text{ m}^2$.

Tendo em conta uma construção pesada ($+750 \text{ kg/m}^2$), uma orientação da parede a sul e uma latitude de 40° (caso de Portugal) [18], consultando as tabelas apresentadas anteriormente e aplicando a equação 24, obteve-se os seguintes resultados (inverno e verão) para o calor libertado por esta parede ao longo de dia. De modo a generalizar, apresenta-se os resultados em W/m^2 .

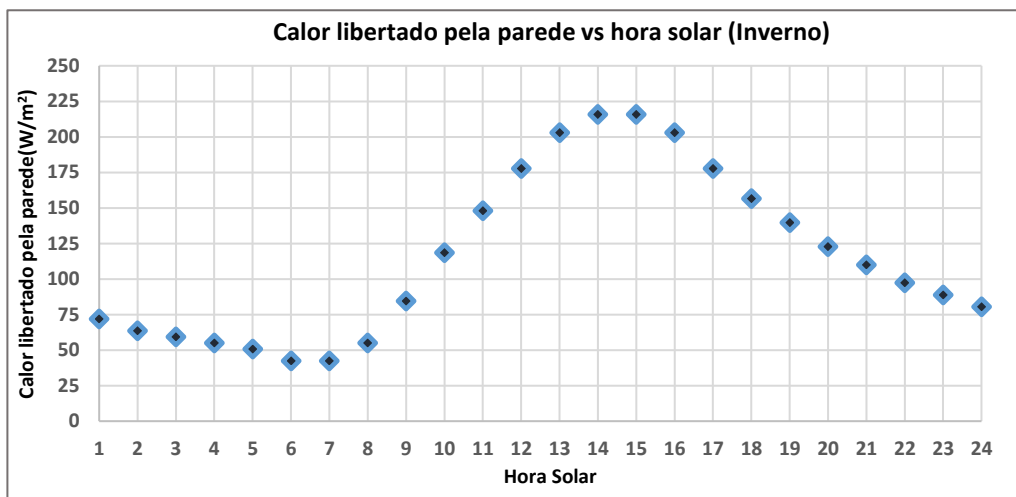


Figura 48 - Calor libertado pela parede durante um dia de Inverno

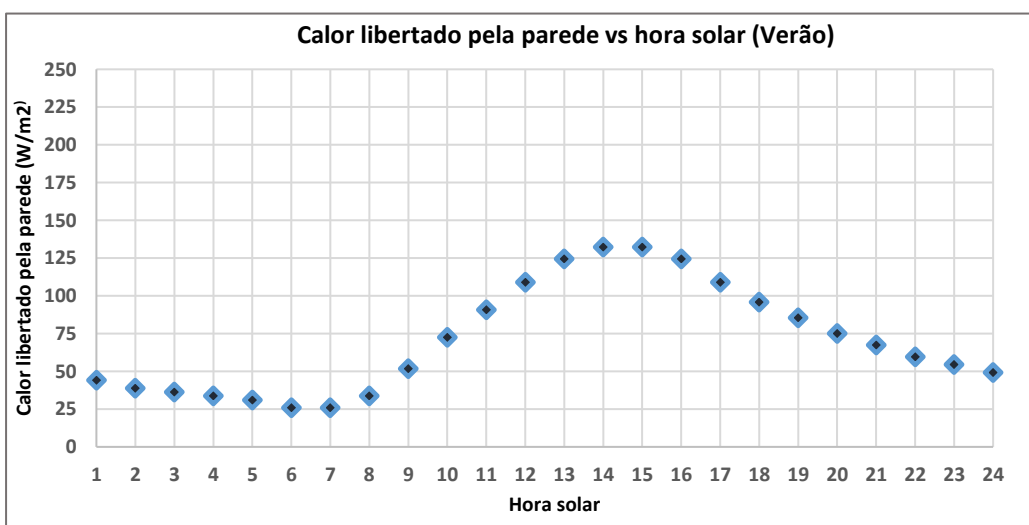


Figura 49 - Calor libertado pela parede durante um dia de Verão

Capítulo 4. Chaminé Térmica

Verifica-se que no verão o calor libertado é menor, pois como a parede está orientada a sul, no inverno os raios solares estão mais alinhados com a parede. Contrariamente, no verão existe um maior ângulo entre uma reta perpendicular à parede e os raios solares, portanto a insulação será menor.

De seguida, e multiplicando as potências anteriores por 21 m^2 (área do coletor), são apresentados os resultados para os dois casos nas renovações de ar por hora no espaço habitável e a diferença de temperatura para o caso do inverno, com vento exterior nulo. É de salientar que se considerou-se uma temperatura para o inverno de 15°C e 31°C para o verão.

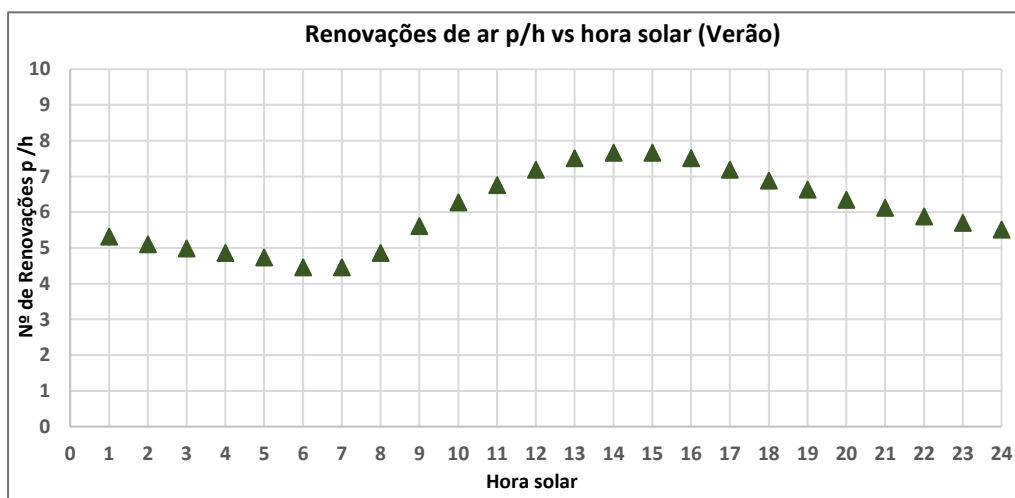


Figura 50 - Nº de Renovações por hora do espaço habitável durante um dia de verão

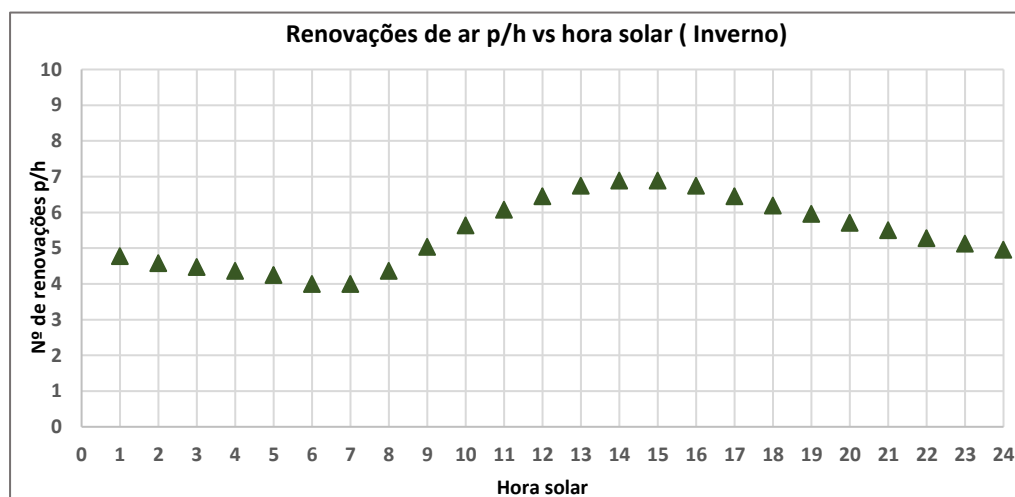


Figura 51-Nº de Renovações por hora do espaço habitável durante um dia de inverno

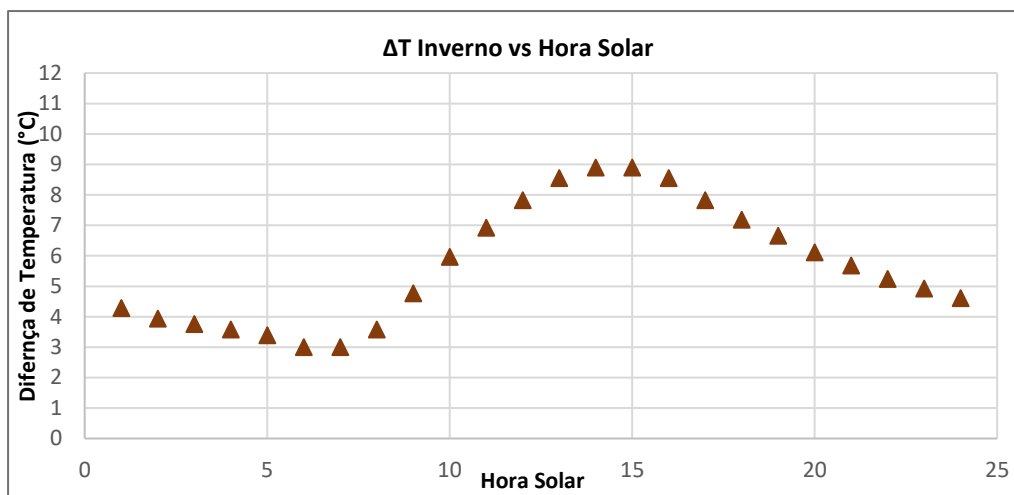


Figura 52 - Diferença de temperatura no espaço habitável durante o dia de inverno

Através de uma análise detalhada dos resultados é possível concluir que o nº de renovações para uma habitação com 210 m³ quando se utiliza este modelo ultrapassa a qualquer hora do dia o número mínimo de renovações para uma habitação (aproximadamente uma renovação por hora). Este resultado deve-se ao facto de existir uma grande área de parede que liberta calor devido à insulação para apenas uma pequena habitação.

É de salientar que devido à utilização da chaminé, observam-se maiores renovações por hora no verão, apesar da parede libertar menos calor.

Ao considerar uma temperatura de 15°C (exterior e interior) no inverno, obteve-se temperaturas na habitação que rondam os 24°C e os 18°C para as horas de maior insulação e durante a madrugada, respetivamente, o que se pode considerar ideal para o bem-estar humano.

Capítulo 5 - Recirculação de ar em aberturas de grande área

No caso de estudo (capítulo 6) surgiu o interesse em perceber o que acontece quando se tem grandes áreas (superior a 8 m^2) de aberturas entre os espaços da habitação. Houve necessidade de efetuar este estudo pois ponderou-se que poderia existir recirculação de ar nessas aberturas devido ao aquecimento que os espaços sofrem, seja através das pessoas ou equipamentos.

O programa utilizado para os cálculos, apresentado anteriormente, não conta com as equações de *Navier – Stokes*, pelo que não permite perceber a turbulências e recirculação de ar que possam existir nos espaços. Deste modo, houve a necessidade de criar um método para que com apenas a equação envolvida no programa, Bernoulli e Continuidade, se possa concluir se existe recirculação.

Quando perante aberturas de grande área, considera-se que não existe perda de carga, assim através da equação de Bernoulli (3) verifica-se que que é necessário colocar o termo da perda de carga (ζ_K) igual à unidade.

O método consiste em dividir as grandes aberturas em várias aberturas de área menor, por exemplo, uma abertura em cima e uma em baixo, ou mesmo três diferentes aberturas, como ilustrado na seguinte figura. Assim, posteriormente é possível perceber se o ar entra em uma das aberturas e está a sair por uma outra, numa cota superior (ou inferior) criando então recirculações de ar. Na figura seguinte está representada na imagem A a abertura com grande área a ser dividida, na imagem B a abertura está dividida em duas, e na C está dividida em três.

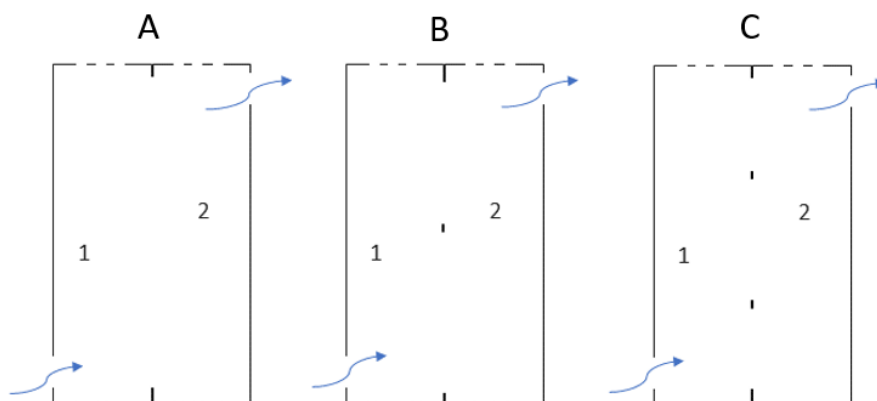


Figura 53 -Ilustração dos tipos de aberturas

Exemplificando, se a primeira a abertura entre o espaço 1 e 2 for de 15 m^2 e se se desprezar o espaço entre as aberturas, então em B tem-se duas aberturas com 7.5 m^2 cada, enquanto que em C tem-se três aberturas de 5 m^2 cada.

Posto este raciocínio, procedeu-se à criação de um exemplo de modo a verificar se realmente existe recirculação entre espaços de geometria simples com os tipos de aberturas mencionadas em cima. Considerando o modelo de estudo da parede de inércia térmica do subcapítulo 4.2 utilizou-se a mesma geometria do edifício, contudo, considerou-se quatro espaços, dois em cima e dois em baixo, com grandes aberturas entre eles.

5.1. 1º Caso – Aberturas completas

Considerando a estação de aquecimento neste subcapítulo, primeiramente estudam-se os quatros espaços com aberturas de 15 m^2 entre eles como ilustrado na figura seguinte, as restantes aberturas têm 1 m^2 . Cada espaço tem uma área em planta de 500 m^2 e volume de 1500 m^3 sem geração de calor e com paredes adiabáticas. O espaço envidraçado com o coletor solar têm 21 m^2 e considera-se a hora de máxima carga solar (15h) gerando assim $21 \text{ m}^2 \times 215,7 \text{ W/m}^2 = 4529,7 \text{ W}$, e tem uma área em planta de $22,3 \text{ m}^2$ e um volume de 134 m^3 . Acrescentou-se ainda uma chaminé ao espaço 5 com área $22,3 \text{ m}^2$ e uma altura de 2 m, de modo a aumentar a ventilação nos espaços. A velocidade do vento exterior é sempre nula, neste e nos seguintes casos deste capítulo.

5.2. 2º Caso – Aberturas divididas sem e com geração de calor.

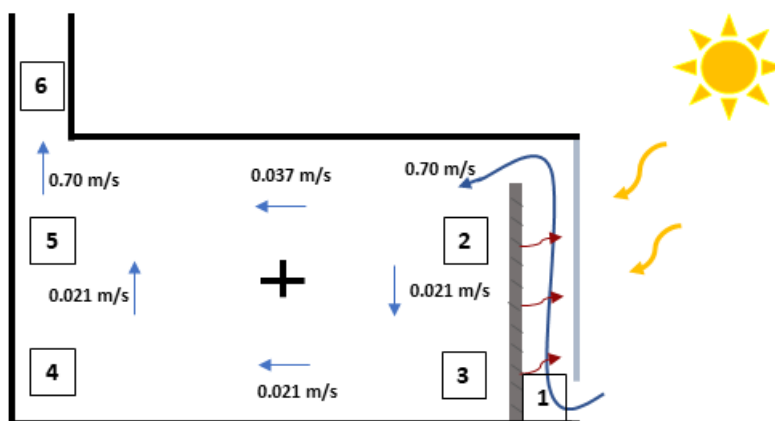


Figura 54 - Ilustração do 1º Caso com direção e intensidade do ar nas aberturas

Na figura 54 pode-se verificar o sentido e intensidade do ar nas aberturas entre os espaços da habitação. O ar faz-se circular como seria de esperar da direita para esquerda, entrando no espaço aquecido (1), dividindo-se no espaço dois com maior intensidade para o espaço 5, e com menor para o espaço 3.

É de referir que a espessura da separação das aberturas é desprezada em todos os casos deste capítulo.

5.2. 2º Caso – Aberturas divididas sem e com geração de calor.

Na figura 55, com o mesmo edifício e com as mesmas propriedades, dividem-se em três as aberturas nos espaços, ficando assim as aberturas entre os espaços com 4 m^2 .

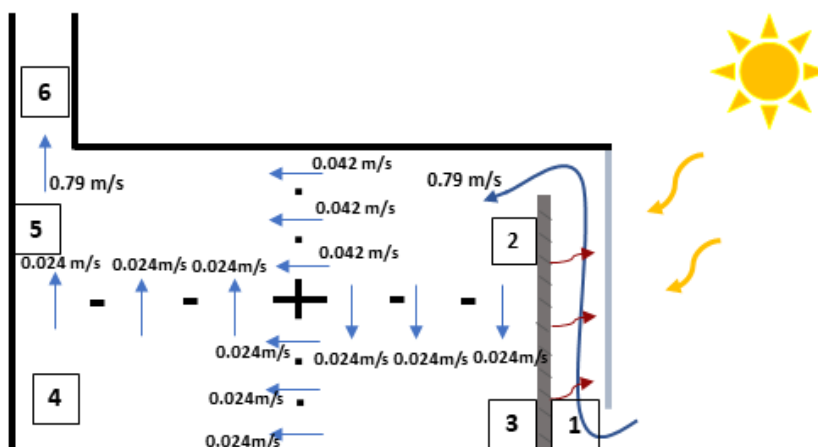


Figura 55 - Ilustração do 2º Caso com direção e intensidade do ar nas aberturas

Verifica-se que o ar segue o mesmo sentido do caso anterior, como também seria de esperar, devido a não existir nenhuma fonte de calor no interior. Estes dois casos serviram para verificar a validade do programa e da construção do edifício em si. Posto isto, com o objetivo de saber se existe recirculação nos espaços para um edifício deste tipo foi criado o mesmo edifício, mas com geração de 500 W de calor nos espaços 2, 3, 4 e 5.

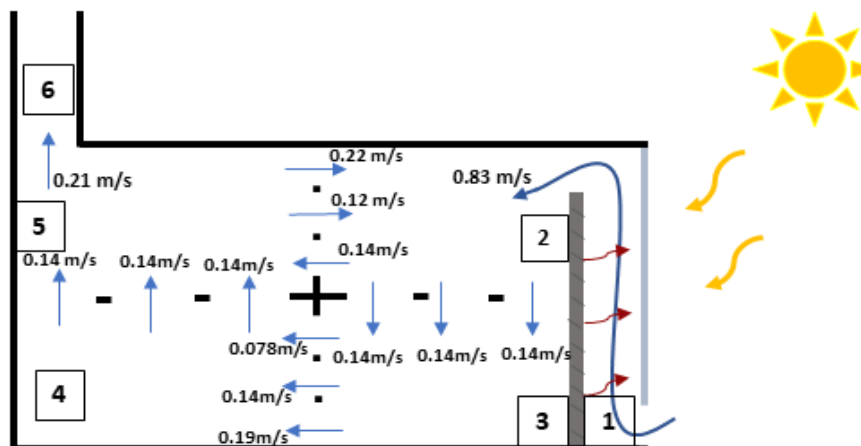


Figura 56 - Ilustração do 2º Caso, direção e intensidade do ar nas aberturas com geração de calor nos espaços

Com este último caso, percebe-se que com a adição de calor nos espaços existe realmente circulação de ar entre as habitações, pois no espaço 5 verifica-se que o ar passa através das duas aberturas superiores para o espaço 2, devido à impulsão térmica resultante nestes espaços. Consegue-se provar assim que é possível detetar recirculações de ar apenas com as equações de Bernoulli e da Continuidade utilizadas no programa. Esta conclusão é deveras importante no caso de estudo deste trabalho, onde existem passagens de grande área de uma sala para outra que têm de ser consideradas como abertura. Como o programa utilizado apenas considera que o ar sai ou entra através da abertura, quando calcula as renovações por hora do espaço este resultado pode ser impreciso pois na abertura de grande dimensão pode haver entrada e saída de ar que não está a ser contabilizada. Assim é importante no caso de estudo dividir estas aberturas para se obterem áreas menores, entre 1 e 4 m² de forma a diminuir estes possíveis erros de calculo.

Capítulo 6 - Caso de estudo – Biblioteca da FCT/UNL

6.1. Introdução

O caso prático da presente dissertação tem como objetivo aplicar e estudar os modelos explicados e criados nos capítulos anteriores. De modo a tornar este estudo mais interessante e prático, modelou-se um o caso a partir de um edifício real, a Biblioteca da FCT/UNL. Este edifício surge como preferência para esta dissertação devido à sua simplicidade geométricas dos espaços interiores, ao seu elevado consumo de energia para satisfazer as necessidades de climatização e também devido a ser um edifício conhecido onde se podem obter informações facilmente sobre a sua construção e equipamentos.

O caso prático envolve a utilização dos métodos descritos anteriormente com o objetivo de se tentar perceber se é viável a utilização desses mesmos métodos em conjunto com a ventilação natural de modo a se conseguir diminuir o consumo energético no que toca à climatização deste edifício.

6.2 O Edifício: Plantas, áreas e equipamentos

O edifício da biblioteca da FCT data a sua construção no ano de 2005. É composto por 4 pisos acima do solo e um piso abaixo no do nível do solo. O edifício tem uma área útil de 6312 m² e possui um sistema AVAC (sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado), com um potencia nominal de aquecimento e arrefecimento superior a 25KW. Trabalham no edifício cerca de 20 funcionários e tem uma utilização média de 800 pessoas por dia [19]. Permite a utilização dos coletores solares estudados anteriormente pois tem a sua fachada principal orientada para sul.

6.2.1 Plantas

De seguida apresentam-se em planta os 4 pisos com as respetivas legendas dos espaços [20].

Capítulo 6 - Caso de estudo – Biblioteca da FCT/UNL

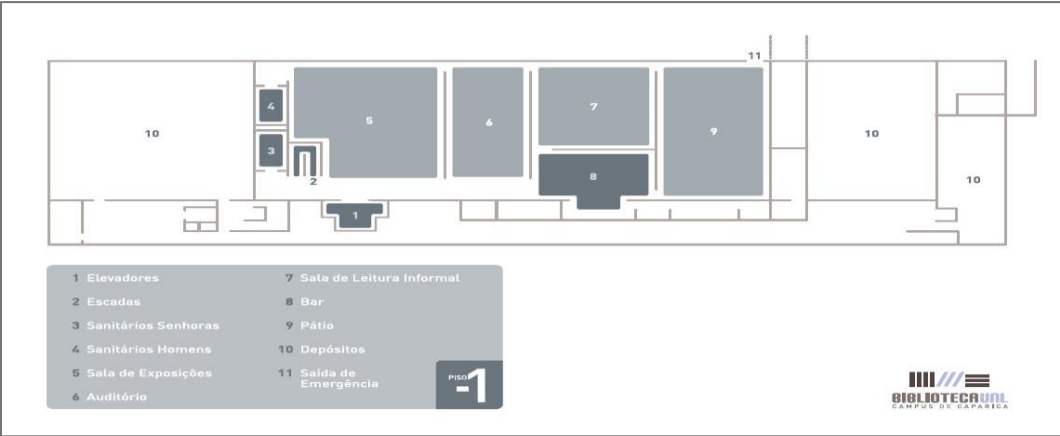


Figura 57 - Planta do piso -1 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL) [20]

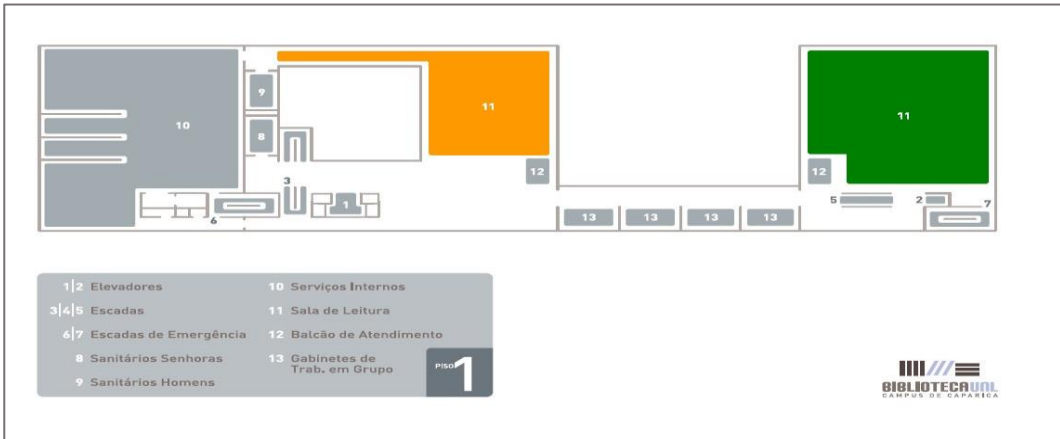


Figura 58 - Planta do piso 1 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL) [20].

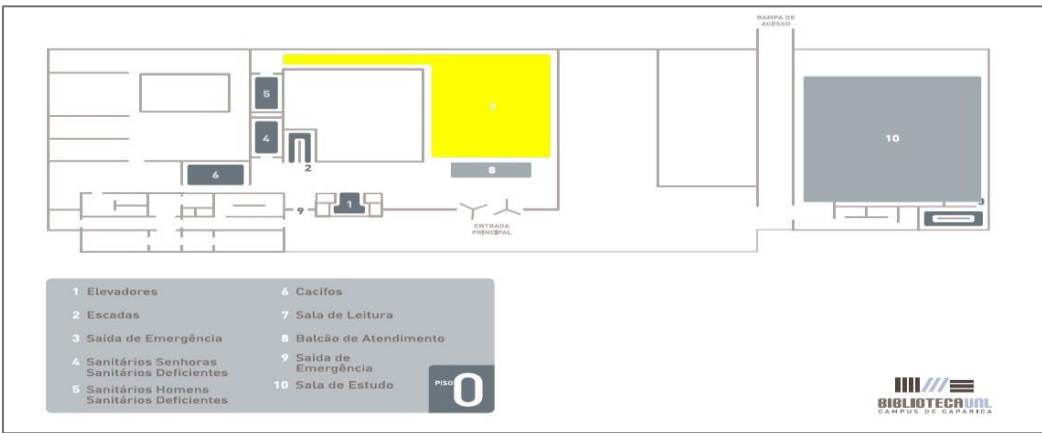


Figura 59- Planta do piso 0 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL)[20]

6.2. Modelação e simplificação do caso de estudo

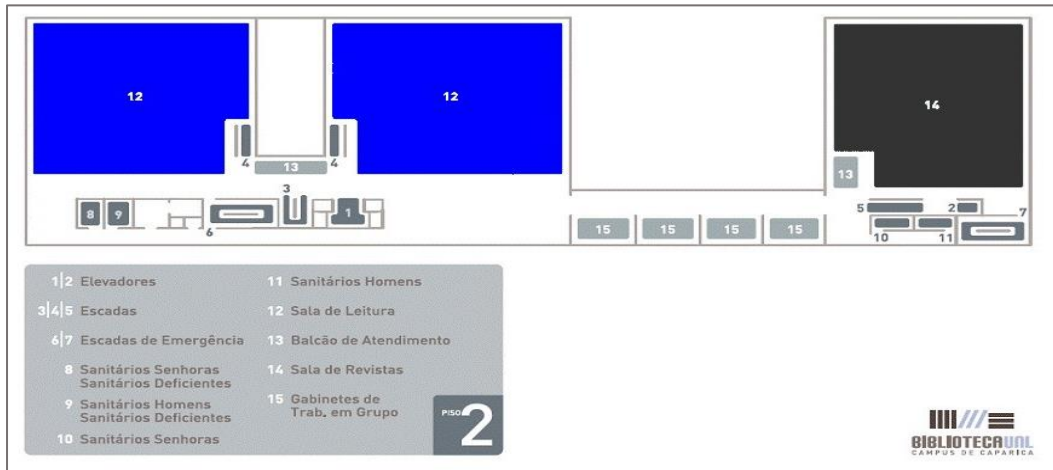


Figura 60 -Planta do piso 2 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL) [20]



Figura 61 - Planta do piso 3 (Edifício da Biblioteca FCT/UNL) [20]

Devido ao grande número de variáveis e complexidade que seria para o programa simular todos os pisos da biblioteca, o trabalho neste caso prático vai corresponder apenas aos pisos 1 e 2/3. É de realçar que os pisos 2 e 3 em conjunto e simplificando pode-se contabilizar apenas como um piso (tendo em conta o somatório das suas áreas) pois o piso 3 são apenas os gabinetes de trabalho individuais sem separação física entre os espaços do piso 2. Posteriormente é explicado como funciona o modelo para estes dois pisos em conta.

6.2. Modelação e simplificação do caso de estudo

De forma a simplificar o estudo sobre o edifício da Biblioteca da FCT distinguiram-se três blocos, de Oeste para Este, o Bloco A, B e C e D. De seguida apresenta-se a ilustração em 3D do edifício simplificado (apenas os pisos 1 e 2/3 em estudo foram desenhados).

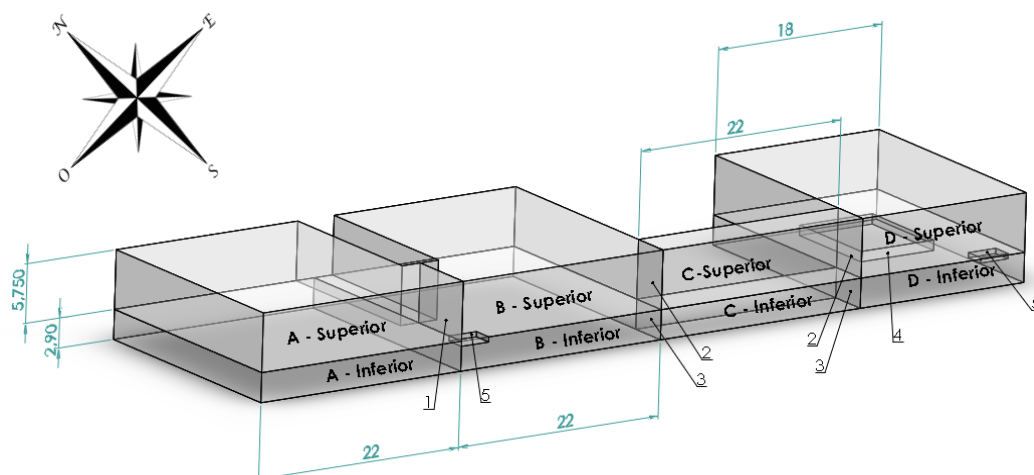


Figura 62 - Desenho 3D em perspectiva do edifício em estudo (medidas reais em metros)

As aberturas entre as salas estão numeradas de 1 a 5 e as suas áreas estão tabeladas a seguir. O número 4 corresponde à abertura que existe na cobertura entre os pisos do bloco D e o número 5 corresponde às aberturas relativas às escadarias entre o piso B inferior/superior e D inferior/superior.

Tabela 1 – Áreas das aberturas interiores

<i>Abertura</i>	<i>Área (m²)</i>
1	14,35
2	9,5
3	4.75
4	70
5	5,8

Devido ao problema de recirculação estudado no capítulo anterior, a área da abertura 1 será dividida em 4 e a abertura 2 é dividida em 3.

Devido à grande dimensão da abertura 4, existe grande dificuldade acrescida no que toca a seria dividir a abertura em pequena área aumentando significativamente o número de variáveis no programa, e como é uma abertura localizada entre os pisos, assim como a abertura 5, pode-se admitir que o ar apenas sobe do piso inferior para o superior (devido à impulsão térmica e o posicionamento das aberturas exteriores apresentadas posteriormente).

6.3. Áreas e volumes dos espaços

Destaca-se que é desprezado a espessura entre as separações dos pisos, assim pode-se considerar que no 2/3 piso as aberturas entre as salas podem-se somar como apenas uma só.

6.3. Áreas e volumes dos espaços

Neste subcapítulo são apresentados o valor do pé direito de cada piso, as áreas dos espaços e os respetivos volumes. Valores estes que são utilizados na modelação do edifício no programa de cálculo.

Tabela 2-Pés direitos

<i>Piso</i>	<i>Pé direito (m)</i>
Inferior	2,90
Superior	5,75

Tabela 3-Áreas e volumes das salas do edifício

<i>Designação da zona/sala</i>	<i>Bloco</i>	<i>Área Total (m²)</i>	<i>Volume (m³)</i>
SGDDB	A - Inferior	386,50	1120,85
Sala Laranja + Zona de Circulação	B - Inferior	231,20 + 388,55	1797,28
Gabinetes de Grupo + Zona de Circulação	C - Inferior	119,00 + 20,70	405,13
Sala Verde + Zona de Circulação	D - Inferior	387,20 + 30,35	1210,90
Sala Azul Ala Esquerda + Gabinetes Individuais + Zonas de Circulação	A - Superior	370,10 + 82,00 + 185,70	3667,35
Sala Azul Ala Direita + Gabinetes Individuais + Zonas de Circulação	B - Superior	428,90 + 110,20	3099,83
Sala de Revistas + Gabinetes Individuais + Zonas de Circulação	D - Superior	218,80 + 69,30 + 50,35	1946,09
Gabinetes de Grupo + Zona de Circulação	C - Superior	108,20 + 20,70	714,18

6.4. Construção do edifício.

De forma a contabilizar as transferências de calor entre as paredes do edifício foi necessário obter as informações sobre os materiais utilizados na construção do mesmo, informação essa disponibilizada mais uma vez pela divisão de apoio técnico da FCT. São aqui contabilizados pra efeitos de cálculo das perdas de calor as paredes exteriores e interiores, a cobertura e os envidraçados.

6.4.1. Paredes exteriores e interiores

Seguidamente apresenta-se os materiais de construção das paredes exteriores e interiores, assim como o coeficiente de transmissão térmica total das paredes.

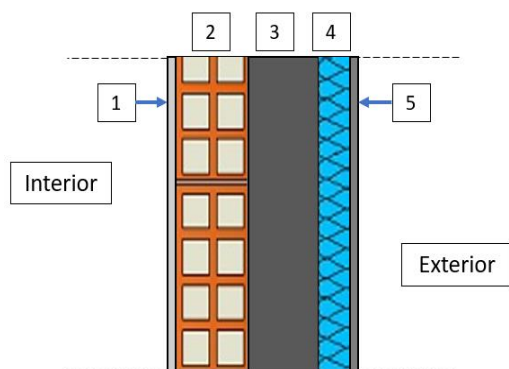


Figura 63 - Paredes exteriores

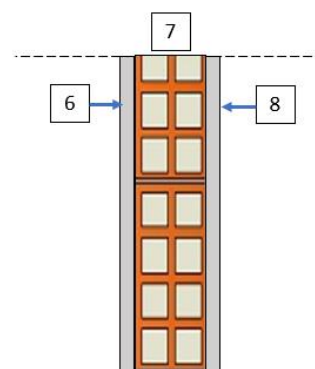


Figura 64 - Paredes interiores

Tabela 4- Construção das paredes exterior

<i>Componentes - Paredes exteriores</i>	Material
1	Estuque – 10m
2	Tijolo – 125 mm
3	Betão armado – 200 mm
4	Poliestireno expandido – 40 mm
5	Resina pintada – 10mm

$$U_{TOTAL} = 0,592 \text{ W/m}^2.\text{°C}$$

Tabela 5 - Construção das paredes interiores

<i>Componentes - Paredes interiores</i>	Material
6	Estuque – 13 mm
7	Tijolo – 105 mm
8	Estuque – 13 mm
$U_{TOTAL} = 1,690 \text{ W/m}^2.\text{°C}$	

6.4.2. Cobertura

A cobertura é preenchida com tela PVC com isolamento térmico (60 mm) coberto a godo, têm também na sua componente laje de betão com vigamentos metálicos. Considerou-se, tendo em conta os materiais utilizados um coeficiente de transmissão térmica $U = 2,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para a cobertura [21].

6.4.3. Envidraçados

Visto a Biblioteca da FCT ser um edifício que aproveita a luz natural como fonte de iluminação é importante saber onde se situam as paredes com grandes áreas de envidraçado por forma a contabilizar as perdas de calor adicionando um coeficiente de transmissão de calor para envidraçados nestas paredes. Todas as salas do piso superior têm grandes áreas de envidraçado, nas salas do bloco A e B ambas têm $86,75 \text{ m}^2$ de envidraçados numa das paredes laterais, enquanto que a sala superior do bloco C tem 80 m^2 de envidraçado no teto. Também os corredores do bloco C, onde se encontram os gabinetes de grupo possuem toda a parede norte em envidraçados, perfazendo uma área de $63,8 \text{ m}^2$ em cada um dos três corredores. Sendo vidros duplos de 6mm admitiu-se um coeficiente de transmissão térmica $U = 3,3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ [22].

6.5. Equipamentos e calor libertado.

Equipamentos como computadores, impressoras, iluminação dissipam calor e contribuem para o aquecimento das habitações e por sua vez para o aumento da impulsão térmica, podendo assim aumentar o fluxo da ventilação natural. Também o ser humano contribui para este aquecimento, sendo provavelmente a fonte de calor que mais contribui para o aquecimento da maior parte dos edifícios [23]. É então importante contabilizar todas estas fontes de calor nas habitações do caso de estudo e quantificar o seu contributo para o aquecimento das salas.

Admite-se que o ser humano quando se encontra em atividade sedentária (quando se encontra numa biblioteca) contribui com um aquecimento de 80 W para o espaço. Um computador contribui em média com 100 W e uma impressora em standby contribui com 150 W [13]. Considera-se que se trata de um caso de ocupação máximo da biblioteca e que essa ocupação dos espaços é dada somente pelos lugares sentados. Admite-se também que 2/3 das pessoas possuem um computador portátil ligado. Todos os computadores fixos estão ligados, assim como as lâmpadas.

O calor emitido quando as luzes elétricas são acesas não é sentido imediatamente como carga térmica de um sistema de ar condicionado de ar, pois a transferência de calor é na sua maior parte por radiação, que vai primeiramente ser absorvida pelos elementos da envolvente e só mais tarde é libertada para o ar ambiente interior. No caso das

lâmpadas fluorescentes o ganho de calor para o espaço a partir do conjunto da instalação admite-se 59% radiativo e 41% convectivo [13][24]. Para este caso consideramos apenas a parcela de calor convectivo na quantificação do calor libertados por lâmpadas.

Todas as lâmpadas no edifício da biblioteca da FCT são fluorescentes, sendo a maior parte compactas. Tendo em conta estas informações, considerou-se em médias lâmpadas com potência de 20W.

As seguintes tabelas contabilizam a calor libertados pelas pessoas e equipamentos nas diversas salas do caso de estudo.

Tabela 6 - Ocupação, máquinas e calor libertado em cada espaço

<i>Sala</i>	<i>Calor total libertado (W)</i>
Bloco A - Piso inferior	3390,4
Bloco A - Piso superior	8553,4
Bloco B - Piso inferior	7225,6
Bloco B - Piso superior	9959,8
Bloco C – Piso Inferior	3585,6
Bloco C – Piso Superior	3585,6
Bloco D - Piso Inferior	11362,8
Bloco D - Piso Superior	6098,4

6.5. Equipamentos e calor libertado.

Tabela 7 - Calor total libertado em cada espaço

<i>Ocupação/Equipamentos</i>		<i>Quantidade</i>	<i>Calor libertado(W)</i>
Bloco A Piso Inferior	Lugares sentados	17	1360
	Computadores	11	1100
	Impressoras	5	750
	Lâmpadas	22	180,4
Bloco A Piso Superior	Lugares Sentados	55	4400
	Computadores	37	3700
	Impressoras	1	150
	Lâmpadas	34	303,4
Bloco B Piso Inferior	Lugares sentados	45	3600
	Computadores	30	3000
	Impressoras	1	150
	Lâmpadas	58	475,6
Bloco B Piso Superior	Lugares Sentados	66	5280
	Computadores	44	4400
	Lâmpadas	34	278.8
Bloco C Piso Inferior	Lugares Sentados	24	1920
	Computadores	16	1600
	Lâmpadas	8	65,6
Bloco C Piso Superior	Lugares Sentados	24	1920
	Computadores	16	1600
	Lâmpadas	8	65,6
Bloco D Piso Inferior	Lugares sentados	76	6080
	Computadores	51	5100
	Impressoras	1	150
	Lâmpadas	4	32,8
Bloco D Piso Superior	Lugares Sentados	40	3200
	Computadores	28	2800
	Lâmpadas	12	98,4

6.6. Modelação do edifício – Inverno e Verão

De forma a aproveitar os modelos estudados nos capítulos anteriores e a impulsão térmica, neste subcapítulo são propostas alterações ao edifício original em estudo (figura 62) consoante a estação, de aquecimento e de arrefecimento.

6.6.2. Estação de aquecimento (Inverno)

Pretende-se nesta estação aproveitar o ar quente proveniente de um coletor solar térmico para ventilar o edifício aquecendo-o e ao mesmo tempo renovando o ar do seu interior. Assim propõem-se as seguintes alterações:

- Coletor solar térmico nas fachadas principais (viradas a sul) dos blocos A, B e D, com separação física entre eles.
- Aberturas entre o espaço coletor solar térmico e ambos os pisos de cada bloco numa cota elevada do coletor de forma a aproveitar a impulsão térmica.
- Chaminé central no bloco B, para extração do ar através do piso inferior e superior.

6.6.3. Estação de arrefecimento (Verão)

Pretende-se nesta estação aproveitar o ar quente proveniente de um coletor solar para transformar este coletor em uma chaminé solar e fazer escoar o ar do edifício através da impulsão térmica. Deste modo será possível trazer ar supostamente mais fresco do exterior renovando sempre o ar do interior. Assim propõem-se as seguintes alterações:

- Coletor solar térmico na fachada principal do bloco B.
- Aberturas no coletor para o espaço inferior e superior do bloco B a uma cota inferior de forma a aproveitar a impulsão térmica para a extração do ar.
- Abertura no topo do coletor com a função de chaminé.
- Aberturas para o exterior na fachada oposta (virada a norte) para insuflação do ar exterior.

Em ambos os casos os coletores solares são aplicados a toda a altura dos dois pisos, $5,75 + 2,9 = 8,65$ m. Adiciona-se ainda 2 m para satisfazer a

6.6. Modelação do edifício – Inverno e Verão

necessidade de chaminé solar no verão, parte esta que fecha ou abre consoante a estação. Fica-se assim com uma altura para os coletores de 10,65 m. Tendo em conta trabalhos realizados com este tipo de coletores solares, é aconselhado um espaçamento entre o envidraçado e a parede de 0,3 m [25], obteve-se uma área em planta dos coletores do bloco A e B de $22 \times 0,3 = 6,6 \text{ m}^2$ e $20 \times 0,3 = 6 \text{ m}^2$ para o bloco D.

Capítulo 7 - Otimização do caso de estudo

Neste capítulo faz-se um estudo preliminar onde são analisados vários casos para se conseguir perceber qual a melhor metodologia para avançar com o caso de estudo proposto no capítulo 6, utilizando para isso o bloco B do edifício. Os casos aqui estudados têm como finalidade perceber como otimizar o estudo no que conta ao posicionamento e utilização das aberturas e chaminés, tanto para a estação de aquecimento, como para a estação de arrefecimento. Em todos os casos deste capítulo utilizam-se modelos com todas as paredes adiabáticas e sem geração de calor nos espaços habitáveis.

7.1. 1º Caso - Verão

Iniciou-se o estudo com a modelação do bloco B para o caso de Verão (estação de arrefecimento). Nesta estação é utilizada a parede de inércia térmica como chaminé solar, ao aquecer o espaço entre o envidraçado e a parede por meio da radiação solar. Como se constata através da figura 62, a área do coletor (ou da parede sujeita à insulação) é de $22 \times 8,65 = 190,3 \text{ m}^2$, assim utilizando a equação 24 e a potência na hora máxima obtida no capítulo 4, gráfico 49, obtém-se uma potência de aquecimento no coletor de 41053 W.

É importante referir que a impulsão térmica leva o ar a sair através da chaminé obrigando a ventilar o edifício com ar novo do exterior que entra na fachada oposta.

Neste primeiro caso da estação de arrefecimento tentou-se verificar se existem diferenças significativas entre colocar as aberturas exteriores numa cota superior ou numa cota inferior em cada espaço. Sendo que todas as aberturas neste capítulo têm secção $1 \times 1 \text{ m}^2$.

A figura seguinte mostra este primeiro caso com as aberturas na cota máxima superior do espaço 1 e do espaço 2. De relembrar que as áreas em plantas e volumes são idênticas ao bloco B.

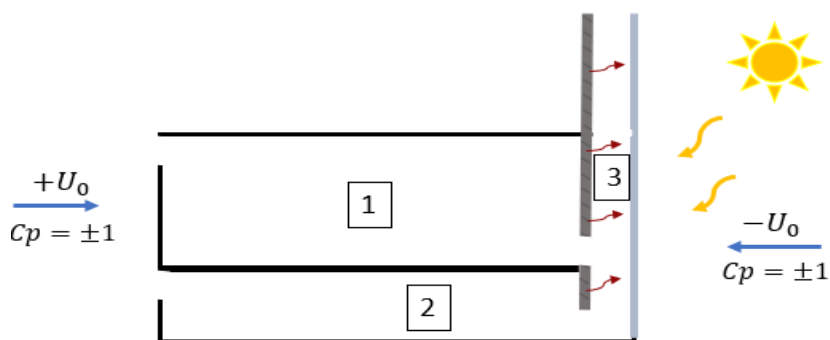


Figura 65 - Ilustração do edifício do 1º caso - Verão

Como se pode constatar as aberturas interiores estão em ambos os espaços 1 e 2 na cota máxima inferior, pois é necessário aproveitar a impulsão térmica dada pelo espaço aquecido entre o envidraçado e a parede, que neste caso funciona como uma chaminé solar.

Avançou-se posteriormente para a simulação e obtenção de resultados fazendo variar o vento exterior de -15 m/s a +15 m/s, e utilizando um coeficiente de pressão igual a 1 (igualmente nos próximos casos deste capítulo). Neste caso e no seguinte deste subcapítulo, o eixo negativo das abcissas (velocidade do vento U_0) corresponde ao vento com direção Sul e o eixo positivo com direção Norte. Obteve-se o seguinte resultado para as renovações por hora dos espaços 1 e 2.

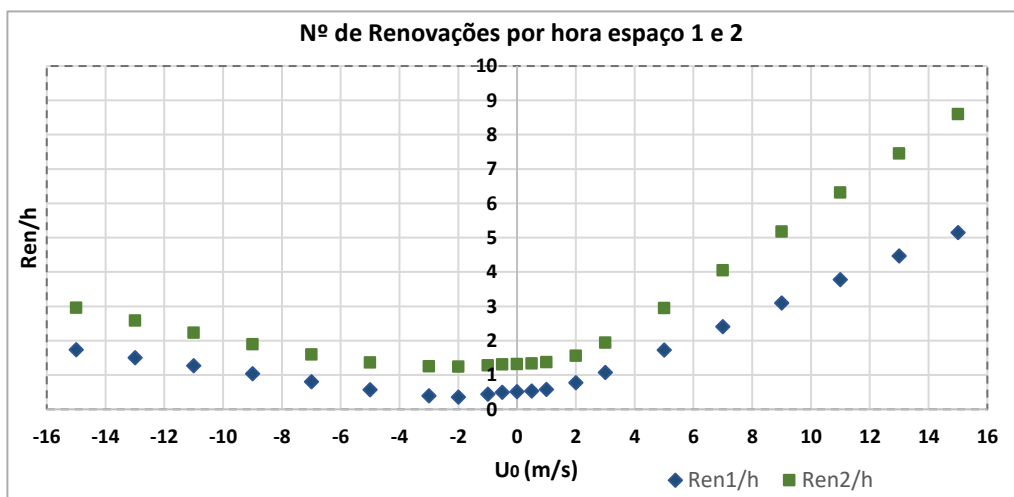


Figura 66 - Nº Renovações vs Velocidade vento exterior – 1º caso verão

Constata-se um maior número de renovações por hora no espaço 2 quando comparado ao espaço 1, devido a este ter menor volume. Como seria de esperar, quando o vento tem direção sul, o ar encontra diretamente as aberturas e então obtém-se maiores taxas de renovação de ar por hora do que quando o vento tem sentido oposto (norte). De

referir, que como visto anteriormente, mesmo com o vento exterior com direção norte, o fluxo de ar dentro do edifício mantém-se da esquerda para a direita, devido ao efeito da chaminé.

7.2. 2º Caso – Verão

De modo a perceber se existem diferenças em colocar as aberturas exteriores em cotas inferiores modelou-se o edifício mostrado na seguinte figura. É de referir que apenas difere do anterior nas cotas das aberturas exteriores que passam a ter a mínima cota possível em cada espaço, utilizando também 1 m^2 para todas aberturas.

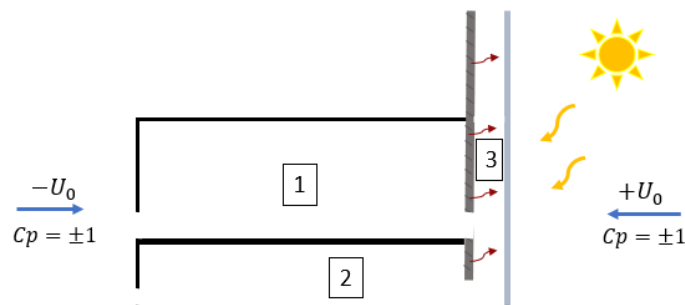


Figura 67 - Ilustração do edifício do 2º caso - Verão

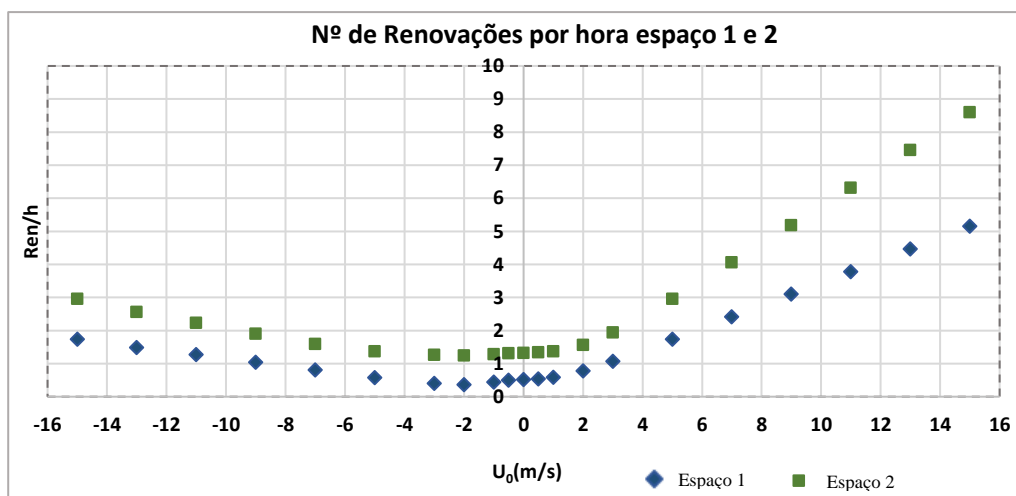


Figura 68 - N° Renovações vs Velocidade vento exterior – 2º caso verão

Depois de analisado os dois casos pode-se concluir que o número de renovações praticamente não varia, com aberturas exteriores em cota superior e inferior. Assim sendo, optou-se por seguir posteriormente com o caso de estudo para a estação de arrefecimento utilizando as aberturas exteriores na cota máximo superior de modo a diminuir zonas de estagnação de ar.

7.3. 1º Caso - Inverno

Na estação de aquecimento é pretendido que o ar aquecido entre a parede e o envidraçado seja inserido nos espaços de habitação. Assim sendo, e continuando a utilizar as duas habitações do bloco B do caso de estudo, encerra-se a saída exterior da chaminé, de forma a esta passar a servir como coletor solar térmico. Posteriormente com os seguintes casos faz-se o estudo do melhor posicionamento das aberturas de forma a ventilar e aquecer os espaços.

Primeiramente neste caso estuda-se o modelo representado na seguinte. Com a chaminé encerrada para o ar entrar dentro dos espaços, tem-se as aberturas no espaço aquecido contíguo aos espaços de habitação na cota máxima destes, de modo a aproveitar o calor e a impulsão térmica. Nestes casos de inverno, o sentido positivo do vento exterior passa a ser sul-norte e vice-versa.

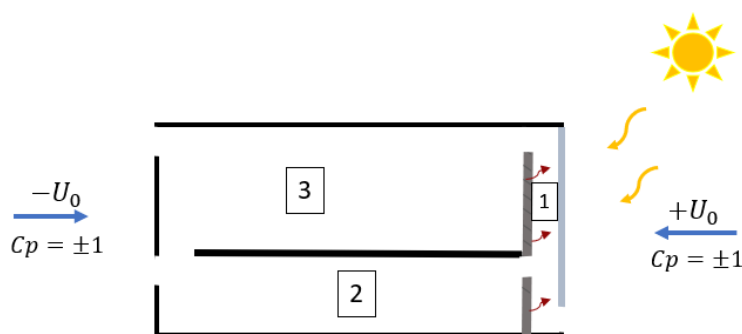


Figura 69- Ilustração do edifício do 1º caso - Inverno

Depois das simulações para este caso, com a mesma gama de velocidades do vento que no caso anterior, verificaram-se os seguintes resultados para renovações por hora e diferença de temperatura nos espaços 2 e 3, partindo de uma temperatura de referência de 15°C.

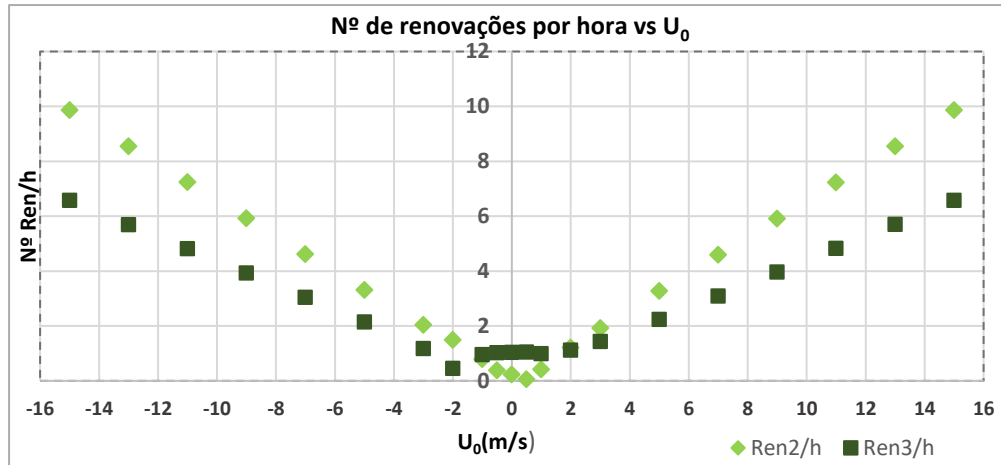


Figura 70 - Evolução do nº renovações / h em função da velocidade do vento exterior – 1º Caso Inverno

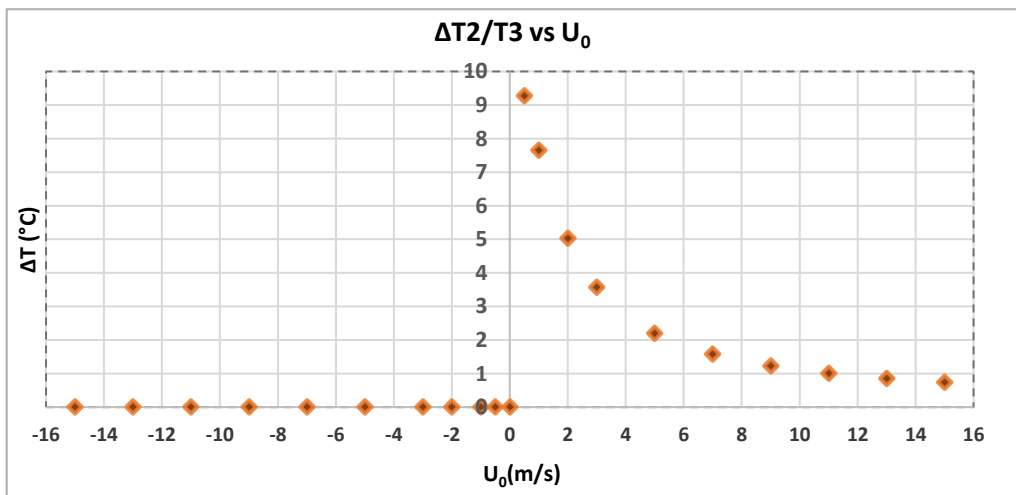


Figura 71 - Evolução da diferença de temperatura no espaço 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 1º Caso Inverno

De modo a entender melhor o que acontece quando a intensidade do vento não é muito elevada, sendo no sentido norte ou sul, é necessário perceber a velocidade e a direção em que entra o ar nas aberturas. Esse resultado é mostrado no gráfico seguinte, que representa nos valores das ordenadas a intensidade do ar nas aberturas interiores dos espaços 2 e 3, positiva quando o ar entra no espaço e negativa quando o ar sai do espaço.

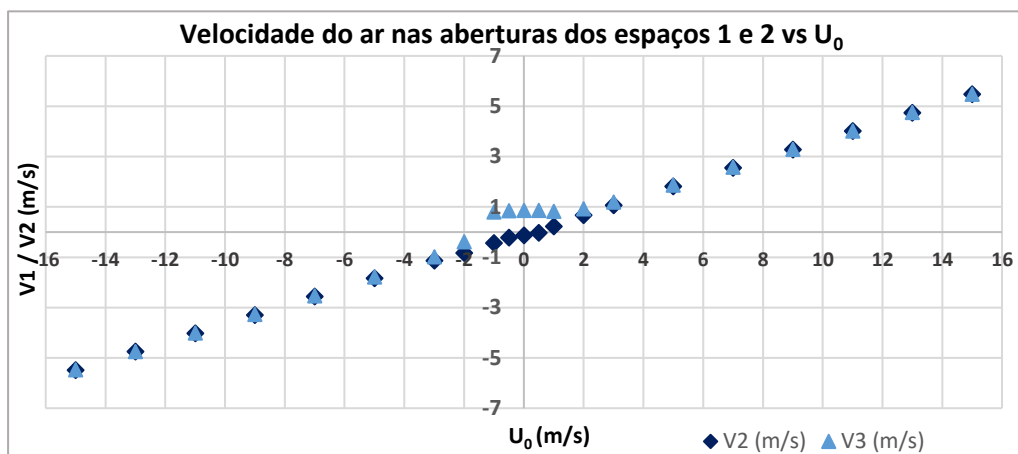


Figura 72 - Evolução da velocidade do ar nas aberturas 1 e 2 em função da velocidade do vento exterior - 1º Caso Inverno

Analisando o último gráfico percebe-se que quando a direção do vento é sul, o ar entra nas aberturas ao contrário do que é desejado, ou seja, em ambas da esquerda para a direita, retirando e desaproveitando o ar aquecido no espaço 1 para o exterior. Isto acontece na gama de velocidade do vento $[-15: -1.8]$ m/s. Já quando a direção do vento é norte, acontece o procedimento desejado, inserindo o ar aquecido dentro dos espaços 2 e 3 entre as gamas de valores da velocidade do vento $[+0.5: 15]$ m/s. Fica assim uma gama de valores onde nenhum destes acontecimentos ocorre, $[-1.8: +0.5]$, nesta gama acontece um fenómeno de recirculação do ar no edifício, onde o ar exterior entra no espaço 2 e no espaço 1 juntando-se neste mesmo espaço 1 e entrando para o espaço 3, que por sua vez é escoado para o exterior através da abertura exterior do espaço 3. Com isto obtém-se um resultado indesejado devido à contaminação do espaço 3 com ar viciado do espaço 2. Este fenómeno vem ilustrado na figura seguinte.

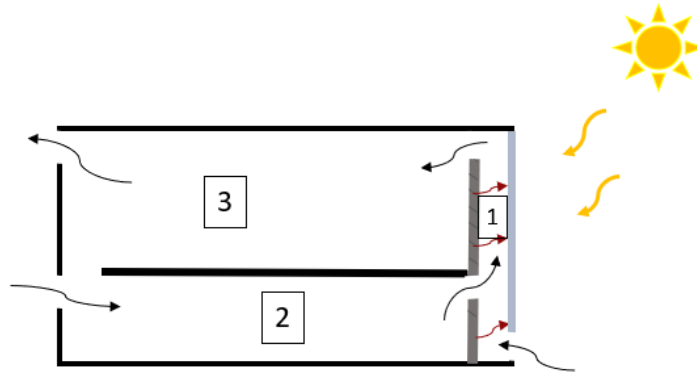


Figura 73 - Ilustração do fenómeno de recirculação do ar

7.4. 2º Caso – Inverno

De forma a evitar este fenómeno e na continuidade deste estudo, modelou-se um caso similar, mas fechando a abertura exterior do espaço 2, como ilustrado na figura que se segue.

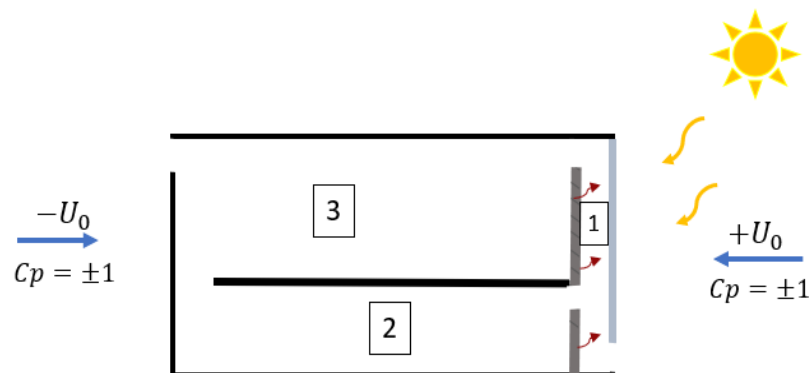


Figura 74 - Ilustração do edifício do 2º caso - Inverno

Para as mesmas condições iniciais do caso anterior, apresentam-se e são analisados em seguida os resultados para o presente caso.

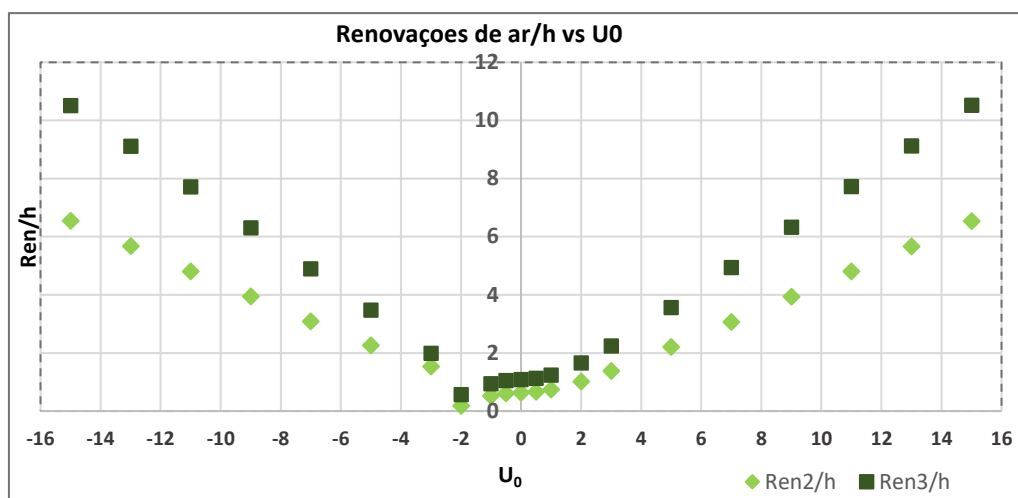


Figura 75 - Evolução do nº renovações / h em função da velocidade do vento exterior – 2º Caso Inverno

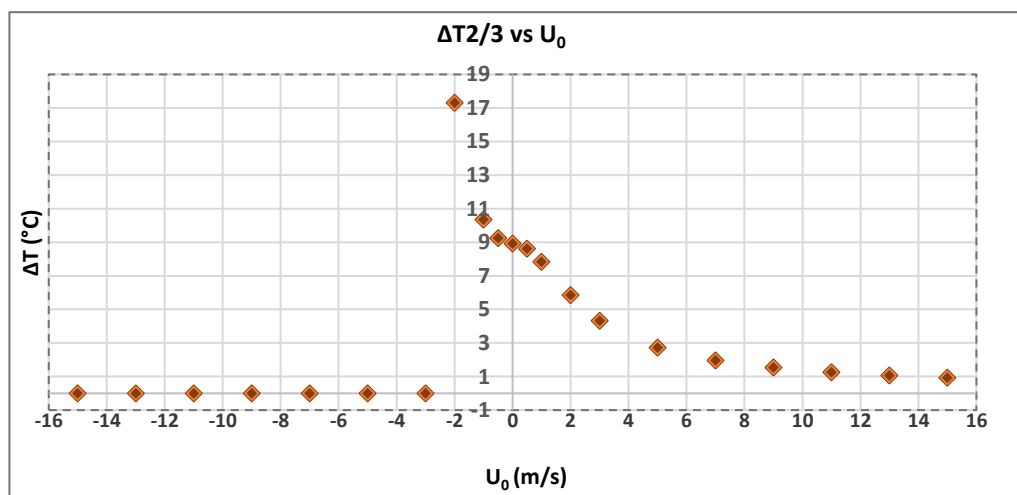


Figura 76 - Evolução da diferença de temperatura no espaço 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 2º Caso Inverno

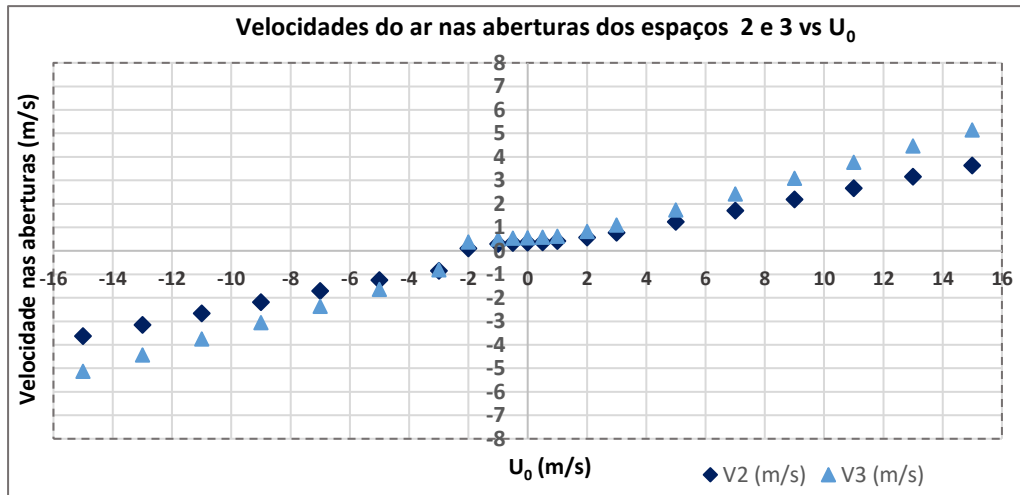


Figura 77 - Evolução da velocidade do ar nas aberturas 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 2º Caso Inverno

Neste último caso, o aquecimento dos espaços é efetuado entre +15 m/s até -2 m/s. A partir de 2 m/s, negativo, pois encontra-se na gama de valores em que o vento é de norte para sul até -15 m/s o ar exterior entra no espaço 3, percorrendo os espaços de modo contrário ao desejado, saindo para o exterior na abertura do espaço 1, evacuando todo o calor diretamente para o exterior. De notar que neste caso consegue-se uma maior gama de valores desejáveis, [-2 : +15] m/s, enquanto no caso 7.3 a gama desejável começa em +0.5 m/s, [+0.5 : +15] m/s. Percebe-se também com os gráficos referentes à diferença de temperatura que se consegue um maior aquecimento dos espaços no modelo anterior, por se atingirem pequenas renovações de ar com pequenas velocidades do vento exterior. Em adição, é de salientar que estes valores elevados de aquecimento nos espaços são indesejáveis devido a esta gama de valores estar longe do mínimo número de renovações de ar.

Quando o ar muda o sentido de entrada nos espaços, ou seja, começa a entrar de norte para sul (esquerda para a direita) a diferença de temperaturas mantém-se, pois, o programa apenas aceita uma temperatura geral, levando a que o exterior e o interior (sem geração de calor) tenham a mesma temperatura.

Depois da análise dos casos anteriores, percebeu-se que o caso 7.4 é mais favorável ao aquecimento do ar nos espaços na estação de aquecimento. Contudo, verifica-se que quando o vento tem direção norte-sul e se ultrapassar a velocidade de 2 m/s o aquecimento anula-se o ar aquecido é desperdiçado para o exterior, como explicado anteriormente. Assim estuda-se em seguida mais um caso, pretendendo-se evitar este acontecimento.

7.5. 3º Caso – Inverno

Pretende-se neste caso adicionar uma chaminé ao modelo do caso anterior, fechando as aberturas exteriores, com o intuito de o ar percorrer os espaços sempre no mesmo sentido. A chaminé tem aberturas para os dois espaços, aberturas essas que ficam na cota mínima desses espaços de modo a evitar zonas de estagnação de ar e consequentemente ventilar devidamente dos espaços. Ilustra-se este caso na seguinte figura.

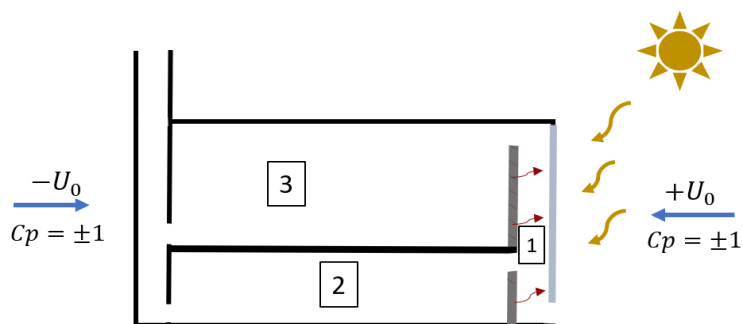


Figura 78 - Ilustração do edifício do 3º caso - Inverno

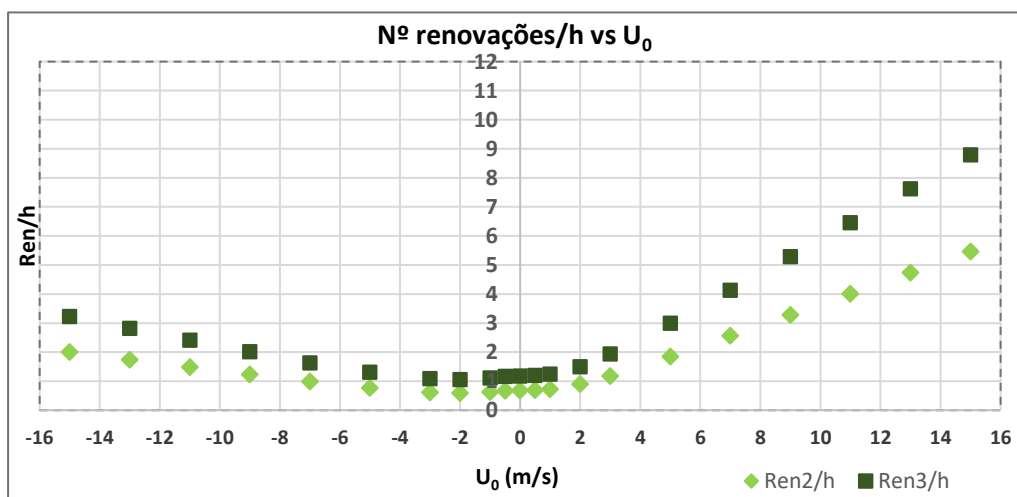


Figura 79 - Evolução do nº de renovações/h dos espaços 1 e 2 em função da velocidade do vento exterior - 1º Caso Inverno

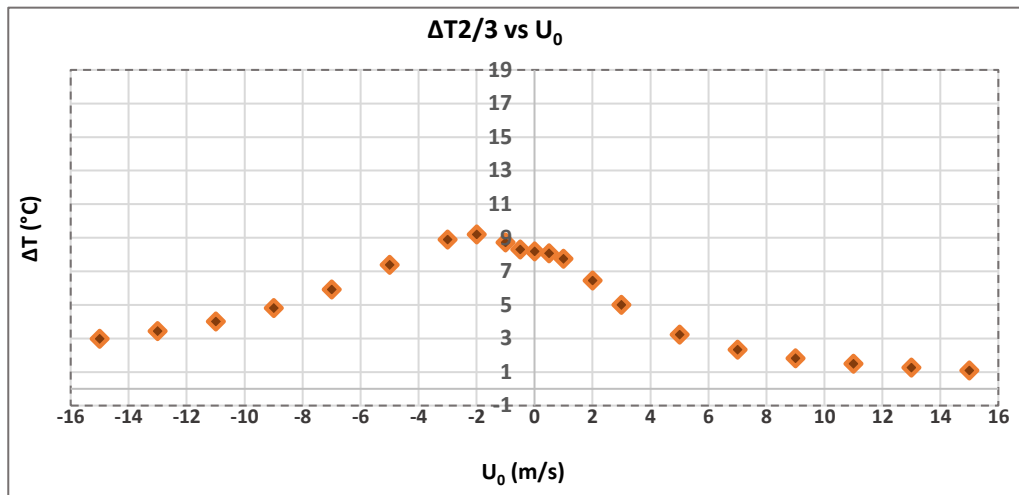


Figura 80 - Evolução da diferença de temperatura no espaço 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 3º Caso Inverno

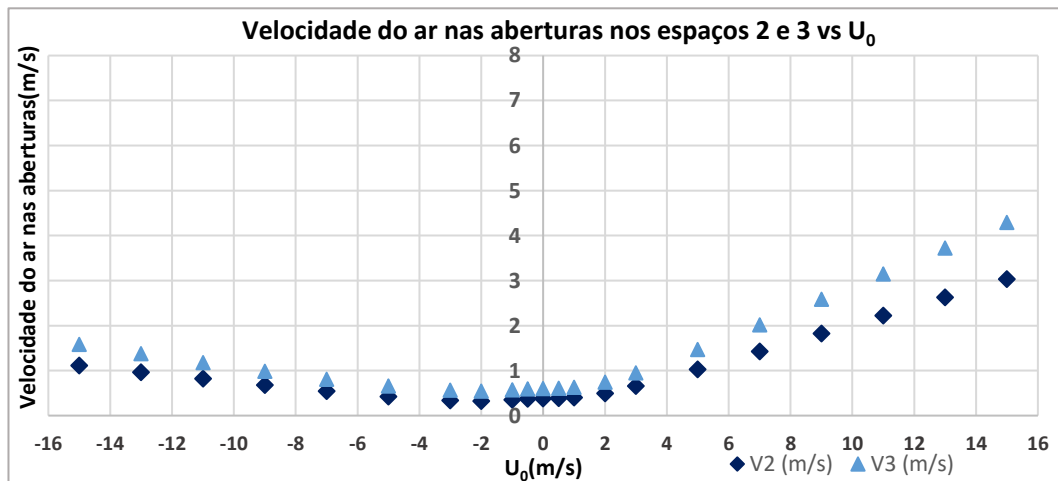


Figura 81 - Evolução da velocidade do ar nas aberturas 2 e 3 em função da velocidade do vento exterior - 3º Caso Inverno

Analisando este último caso e comparando ao caso anterior a este sem chaminé, constata-se como era de esperar que o ar exterior entra sempre no espaço 1, entrando aquecido dentro dos espaços habitáveis 2 e 3 qualquer que seja a intensidade e direção do vento. Verifica-se no caso com chaminé, uma diminuição do número de renovações por hora, como se pode ver na seguinte tabela:

Tabela 8 - Renovações por hora em função utilização de chaminé

Velocidade do Vento (m/s)	Baixa – 2 m/s	Média – 7 m /s	Alta – 13 m /s
Renovações por hora espaço 3– Sem chaminé	1,7	4,9	9,1
Renovações por hora espaço 3 – Com chaminé	1,5	4,1	7,6

Apesar desta diminuição, é desejável prosseguir com este último modelo, pois para velocidades do vento média e baixa, que são as velocidades que ocorrem com maior probabilidade na região onde se encontra o caso de estudo, a diferença não é significativa. E como verificado, neste último modelo tem-se sempre o efeito desejado em toda a gama de valores de velocidade do vento.

Conclui-se que no caso de estudo devem ser utilizados os seguintes modelos estudados neste capítulo.

- Estação de arrefecimento (verão) – 2 ° Caso
- Estação de aquecimento (inverno) – 3 ° Caso

No caso da estação arrefecimento, o 2º caso é utilizado apenas para o bloco B, pois supõe-se que o calor transferido por condução nas paredes do coletor possa ser desfavorável nesta estação, cobrindo os coletores solares do bloco A e D com um material isolante. Enquanto que na estação de aquecimento o caso escolhido vai pertencer ao bloco B enquanto que o bloco A e o bloco C entram no estudo como o 2º caso estudado neste capítulo mas sem ligação ao exterior, ou seja o ar circula nas salas e passa para o bloco B onde se encontra a chaminé. Assim no próximo capítulo consegue estudar se apenas uma chaminé no bloco B é suficiente para satisfazer as necessidades de ventilação e aquecimento, conseguindo-se aproveitar melhor o calor que entra para as salas do edifício.

7.6. Áreas das aberturas propostas

Todas as aberturas exteriores e os interiores que ligam coletor solar térmico aos espaços têm secção retangular ao longo da parede tanto para aproveitar o calor dos coletores solar térmicos como para evitar zonas de estagnação de ar nos espaços. Estas aberturas têm seção 16 x 0,15 m, perfazendo uma área de 2,4 m² cada uma. Na chaminé, com passagem aberta ao ar na estação de aquecimento, tem-se duas aberturas em contacto com

o bloco B, uma no piso superior e outra no piso inferior, as duas na cota mínima destes espaços, com seção 2 x 0,5 m. A abertura da chaminé para o exterior tem seção 3 x 1,5 m. O espaçamento entre o envidraçado e a parede é 0,3 m, como visto anteriormente.

7.7. Edifício final

Apresentam-se nas figuras seguintes o edifício com os melhoramentos e alterações propostas para as duas estações de climatização, também o sentido do ar nas aberturas que seria de esperar, tendo também em conta algumas simulações que o provaram. É esta a configuração que será introduzida no programa, modelando-se um caso para o inverno, que contém 70 variáveis, e outro caso para o verão, que contém 61 variáveis.

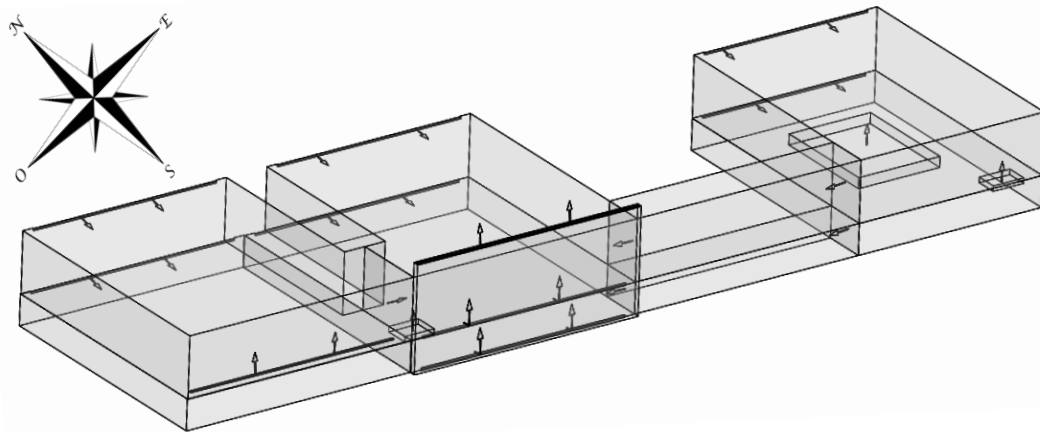


Figura 82 - Edifício com as modificações e sentido do ar nas aberturas para a estação de arrefecimento

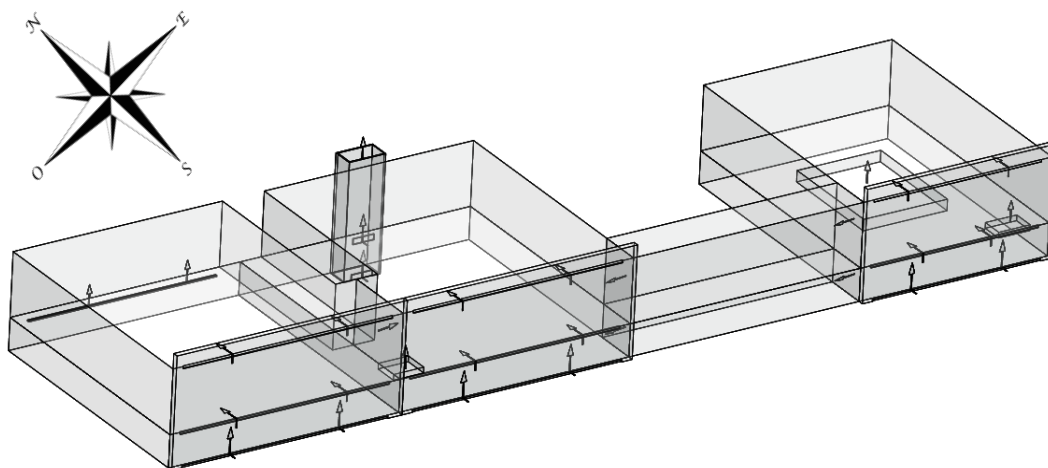


Figura 83 - Edifício com as modificações e sentido do ar nas aberturas para a estação de aquecimento.

O coletor solar térmico do bloco A e B têm uma área de parede 22 x 8.65 m, enquanto no bloco D tem 18 x 8.65 m.

Capítulo 8 - Parâmetros de calculo

Previamente ao cálculo e apresentação dos resultados finais, é necessário definir vários parâmetros e conjunto de valores importantes para este caso em estudo. Os parâmetros calculados neste capítulo são os seguintes:

- Coeficientes de pressão nas aberturas exteriores.
- Distribuição de Weibull e orientação do vento.
- Temperatura exterior.
- Taxa de ventilação.
- Dimensionamento do ventilador.
- Potências de cada coletor solar térmico.

8.1 Coeficiente de pressão

Neste subcapítulo são calculados os coeficientes de pressão nas paredes onde existem as aberturas exteriores do caso de estudo.

No anexo E estão os dados retirados da Norma Europeia [26] que permite o obter os coeficientes de pressão em paredes retangulares consoante a direção do vento.

As seguintes figuras mostram quatro direções do vento na fachada principal, lateral direita, traseira e lateral esquerda. Direções estas que correspondem, respetivamente a norte, oeste, sul e este. Consultando as tabelas da Norma Europeia, e sabendo que estamos perante uma geometria da parede retangular com $b > h$ e $h/d = 0.36$, como o anexo apenas tem valores para $h/d = 5$, 1 e menor que 0.25, usa-se interpolações lineares para calcular os valores dos coeficientes de pressão.

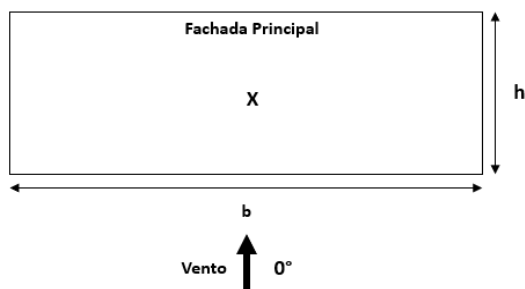


Figura 85 - Vento incidente na fachada principal

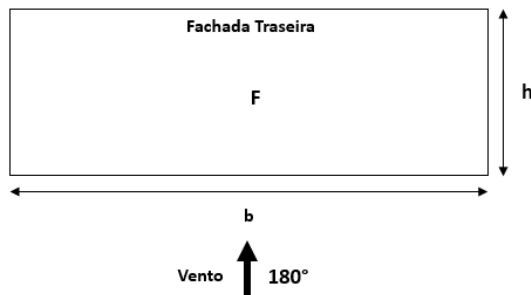


Figura 84 - Vento incidente na fachada traseira.

Capítulo 8 - Parâmetros de calculo

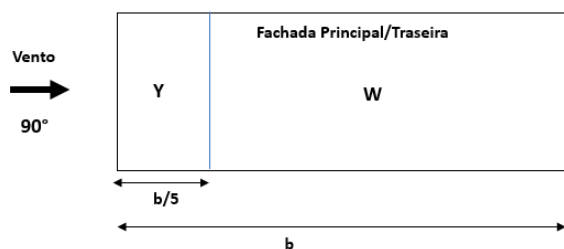


Figura 86 - Vento incidente na fachada lateral esquerda

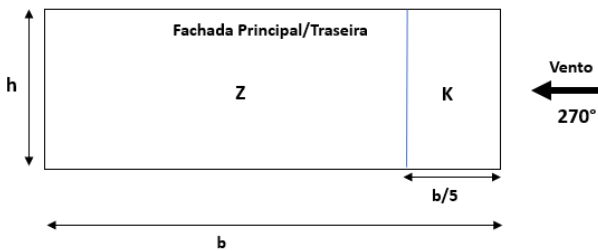


Figura 87 - Vento incidente na fachada lateral direita.

Verifica-se que para ventos laterais existem dois locais com diferentes coeficientes de pressão, W e Y para ventos com direção Oeste, K e Z quando o vento tem direção Este. Como as secções Y e K perfazem um quinto do comprimento da fachada do edifício, ou seja, 16,8 m, admite-se que as aberturas que existem no bloco A e D estão sujeitas ao coeficiente de pressão de Y e K respetivamente.

Por outro lado, quando o vento tem direção norte ou sul (0° e 180°) toda a fachada principal ou traseira está sujeita ao mesmo coeficiente de pressão.

Consultando as tabelas da Norma Europeia, e sabendo que estamos perante uma geometria da parede retangular com $b > h$ e $h/d = 0.36$, como o anexo apenas tem valores para $h/d = 5$, 1 e menor que 0,25, usam-se interpolações lineares entre os valores de $h/d = 1$ e menor que 0,25 para calcular os valores dos coeficientes de pressão.

No caso em estudo apenas há interesse em saber o coeficiente de pressão na fachada principal e traseira, sendo nestas onde estão colocadas as aberturas exteriores. Assim para estas duas fachadas apresenta-se o seguinte gráfico com os coeficientes de pressão consoante a direção do vento.

Tabela 9-Coeficientes de pressão nas paredes do caso de estudo

<i>Bloco</i>	Coeficiente de Pressão			
	0°	90°	180°	270°
Fachada Principal				
A	1	-1,4	-0,67	-1,1
B	1	-1,1	-0,67	-1,1
D	1	-1,1	-0,67	-1,4
Fachada Traseira				
A	-0,67	-1,4	1	-1,1
B	-0,67	-1,1	1	-1,1
D	-0,67	-1,1	1	-1,4

Verifica-se que a orientação do vento mais favorável à ventilação natural é 0° na fachada principal e 180° na fachada traseira, é este coeficiente de pressão que será utilizado no caso de estudo. Para as aberturas exteriores das chaminés, admite-se um coeficiente de pressão de 1,15 [11].

8.2 Temperatura exterior

Naturalmente, é importante considerar as temperaturas exteriores quando se trabalha com ventilação natural nas diferentes estações. Neste caso é necessário perceber como varia a temperatura ao longo do dia na região de Almada, Portugal. Consultando o documento do *Diário da Republica* [27], encontra-se a tabela em anexo F que fornece, entre outros dados, a temperatura de projeto exterior para a estação de arrefecimento e amplitude térmica para cada concelho de Portugal.

Para a região de Almada a temperatura externa de projeto para a estação de aquecimento é de 31°C com amplitude térmica 10°C.

Se forem conhecidas as temperaturas máxima e mínima diária e as horas em que ocorrem, pode-se utilizar um perfil horário de temperatura, que é constituído por três ramos sinusoidais dados pelas seguintes equações. Consequindo-se uma aproximação da variação da temperatura ao longo do dia na região em estudo [28].

$$\theta(t) = \bar{\theta} + \frac{\Delta\theta}{2} \cos\left[\frac{180}{24 - H_M + H_m}(-t + 24 - H_m)\right], \quad 0 \leq t \leq H_m \quad (25)$$

$$\theta(t) = \bar{\theta} - \frac{\Delta\theta}{2} \cos\left[\frac{180}{H_M - H_m}(t - H_m)\right], \quad H_M \leq t \leq H_m \quad (26)$$

$$\theta(t) = \bar{\theta} + \frac{\Delta\theta}{2} \cos\left[\frac{180}{24 - H_M + H_m}(t - H_M)\right], \quad H_M \leq t \leq 24h \quad (27)$$

Com:

- θ - Temperatura exterior (°C).
- $\bar{\theta}$ - Temperatura média (°C).
- $\Delta\theta$ - Amplitude térmica (°C).
- t - Hora do dia.

Capítulo 8 - Parâmetros de cálculo

- H_m – Hora do dia de temperatura mínima.
- H_M – Hora do dia de temperatura máxima

Considera-se que a temperatura mínima ocorre às 6h da manhã e a temperatura máxima ocorre às 16h da tarde, assim calcula-se a temperatura média com a seguinte expressão:

$$\bar{\theta} = \frac{31 + (31 - 10)}{2} = 26^\circ\text{C} \quad (28)$$

Seguidamente apresenta-se a evolução da temperatura ao longo do dia, resolvendo as equações 25, 26 e 27 para cada hora do dia.

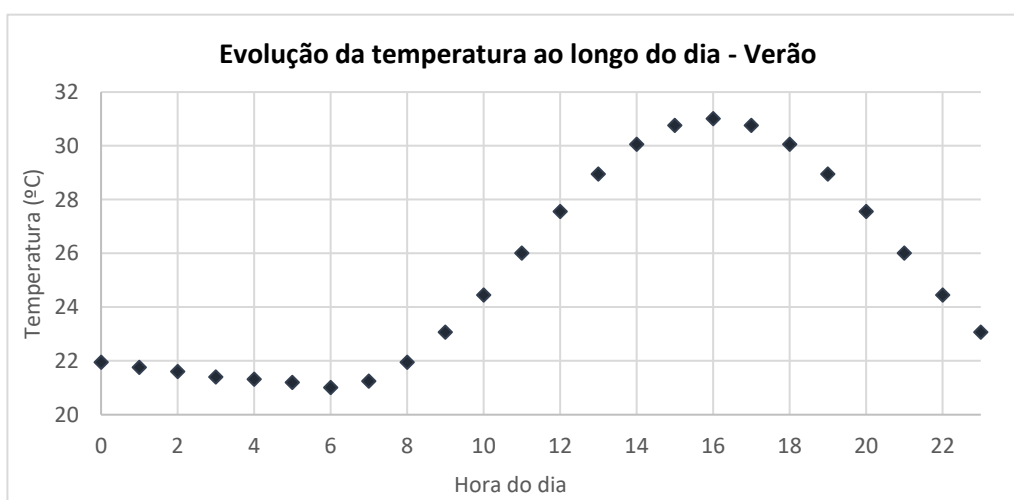


Figura 88-Temperatura ao longo de um dia de verão na região de Almada

Na estação de arrefecimento (Inverno) costuma-se considerar constante a temperatura exterior de projeto, assim consultando registos da temperatura no mês de janeiro [REF] considera-se uma temperatura constante ao longo do dia para a estação de arrefecimento de 12°C para a região de Almada [29].

8.3. Taxas de ventilação

Por definição, a taxa de ventilação é o caudal volúmico de ar que entra e sai de um espaço, expresso em m^3/h . Atualmente a taxa de ventilação é de extrema importância para providenciar a renovação do ar aos ocupantes, com o objetivo de assegurar uma boa qualidade do ar. De modo a quantificar a taxa de ventilação é comum utilizar-se o conceito de número de renovações horárias [30].

8.4. Distribuição de Weibull e orientação do vento.

$$R_{ph} = \frac{Q}{V} \quad (29)$$

- R_{ph} – Número de renovações por hora (h^{-1})
- Q – Caudal volúmico de ventilação ($m^3 \cdot h^{-1}$)
- V – Volume do espaço (m^3)

Assim o número de renovações por hora pode ser interpretado como o número de vezes que um determinado espaço renova o ar existente no seu interior por cada hora. Todavia, se a renovação horária tiver o valor de $1h^{-1}$ significa que o caudal que é admitido na zona em estudo durante uma hora é igual ao ar já existente na zona e não que o ar é todo renovado.

O número de renovações por hora não é constante ao longo do tempo, dependendo das condições atmosféricas e também das áreas das aberturas, ou do modo como são operadas cada abertura. Por exemplo, quando existe uma maior diferença de temperatura entre o exterior e o interior ou quando se abre uma janela/porta, o caudal aumenta significativamente, aumentando a taxa de renovação horária. Conclui-se assim que o valor de R_{ph} é válido apenas para o período em que é calculado [30].

Cada edifício deve cumprir com uma certa taxa de renovação por hora, dependendo de vários fatores como: taxa de ocupação, equipamentos, ganhos térmicos, libertação de gases, entre outros que influenciem o ar interior e o bem-estar dos ocupantes.

Para edifícios como bibliotecas, com elevada taxa de ocupação sedentária e grande número de equipamentos, como computadores, que libertam calor, definiu-se um número de renovação por hora a cumprir de 3 a 5 R_{ph} [31]. Posteriormente nos resultados deste caso de estudo, as salas vão ter de cumprir este número de renovações de ar.

8.4. Distribuição de *Weibull* e orientação do vento.

A localização geográfica do edifício é de extrema importância em um trabalho de ventilação natural, pois cada localização tem diferentes velocidades médias e orientação dos ventos.

Foi então necessário caracterizar o vento local, criou-se assim a Distribuição de *Weibull*. Esta função é frequentemente utilizada para o recurso eólico e é calculada através de dois parâmetros, o parâmetro de escala A (m/s) e o parâmetro de forma k (adimensional).[32]. Quando calculada obtém-se uma representação estatística razoável daquela

que é a distribuição da velocidade instantânea do vento ao longo do ano. A lei de distribuição de Weibull pode ser expressa pela seguinte expressão [33]:

$$p(u) = ku^{k-1} A^{-k} \exp \left[-\left(\frac{u}{A}\right)^k \right] \quad (30)$$

Como $p(u)$ se trata de uma função probabilidade pode-se escrever:

$$\int_0^{\infty} p(u) du = 1 \quad (31)$$

O parâmetro de escala (A) está relacionado com o k e com a velocidade média anual, \bar{u} , e para a gama típica de k no âmbito da descrição estatística do vento, considera-se $A = 1,125\bar{u}$ [33].

A figura seguinte mostra alguns valores do parâmetro k , para Portugal Continental o valor mais utilizado é $k=2$, é este o valor que será utilizado neste trabalho. Assim com $k=2$ esta distribuição passa a ser a chamar-se *Reyleigh*, que é um caso particular da distribuição de *Weibull* com $k=2$.



Figura 89 - Alguns valores do parâmetro k da distribuição de Weibull para Portugal Continental (A partir de dados do INETI para ano 1999) [33].

A velocidade média do vento, u , para a zona do caso de estudo (Monte da Caparica) é de 3 m/s, dados retirados de [34].

Conhecendo os valores de A , k e \bar{u} apresenta-se o seguinte gráfico para a distribuição de Weibull para a região em estudo.

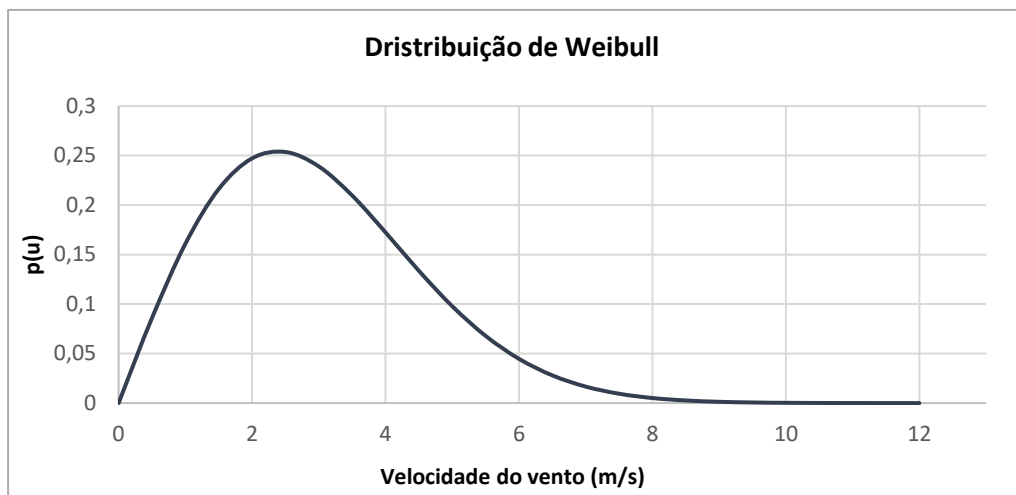


Figura 90 - Distribuição de Weibull

Pode-se dizer que para a região em estudo tem-se uma gama de valores prováveis de velocidade do vento exterior de aproximadamente $[0;8]$ m/s

É importante referir que a distribuição não é simétrica; a velocidade do vento de maior probabilidade de ocorrência é a velocidade modal e a velocidade que divide a área abaixo do gráfico em duas partes iguais é a velocidade mediana [33].

Em adição, também é importante perceber qual é a mais provável orientação do vento na região, consultando dados de registos ao longo dos anos apresenta-se a seguinte distribuição da orientação do vento na zona de Almada, registado ao longo do ano.

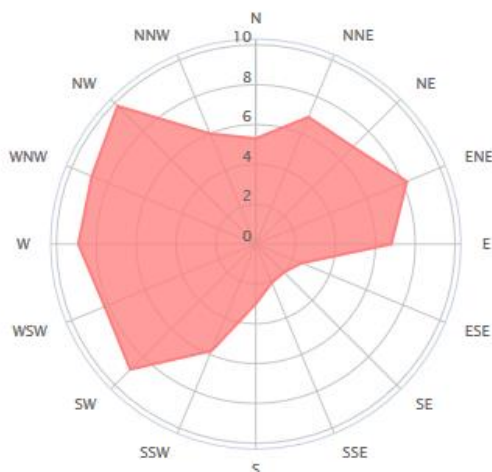


Figura 91 - Distribuição anual da direção do vento em percentagem [34].

Percebe-se assim que a maior parte da direção do vento nesta zona está direcionada para oeste, noroeste e sudoeste.

8.5. Potência do coletor solar térmico

No presente caso de estudo existem três coletores solares na fachada principal, orientados a sul, de modo a receber a luz solar na maior parte do dia (devido ao edifício se localizar no hemisfério norte, a 40° de latitude). Tal como foi previamente mencionado, no verão existe apenas um coletor solar, que funciona como chaminé solar, no bloco B, cobrindo-se os restantes com um material opaco. Enquanto que no inverno têm-se os três coletores em funcionamento de modo a fornecer calor solar ao edifício.

A diferença nos resultados entre os coletores apenas depende a área da parede exposta aos raios solares, assim o coletor do bloco A e B vão ter valores semelhantes, já o bloco D apresentará valores menores, devido à sua menor área de exposição solar.

Utilizando o modelo de cálculo explicado no capítulo 4 e as tabelas em anexo B, C e D, consideraram-se os seguintes fatores:

- Vidro do coletor tem espessura 6 mm, que corresponde a um fator de ganho solar de 0,94 [17]
- Não existem sombras que condicionem os raios solares de chegar ao envigado.
- A construção das paredes exteriores tem 750 kg/m^2 ou mais, tendo em conta a construção das paredes estudadas no capítulo 5.
- Edifício com latitude 40° norte.
- Mês de janeiro para a estação de aquecimento e mês de julho para a estação de arrefecimento.

Com estes dados obtiveram-se os valores para resolver a equação 24 e construir os seguintes gráficos que revelam a potencia (em KW) conseguida por cada coletor ao longo do dia.

8.5. Potência do coletor solar térmico

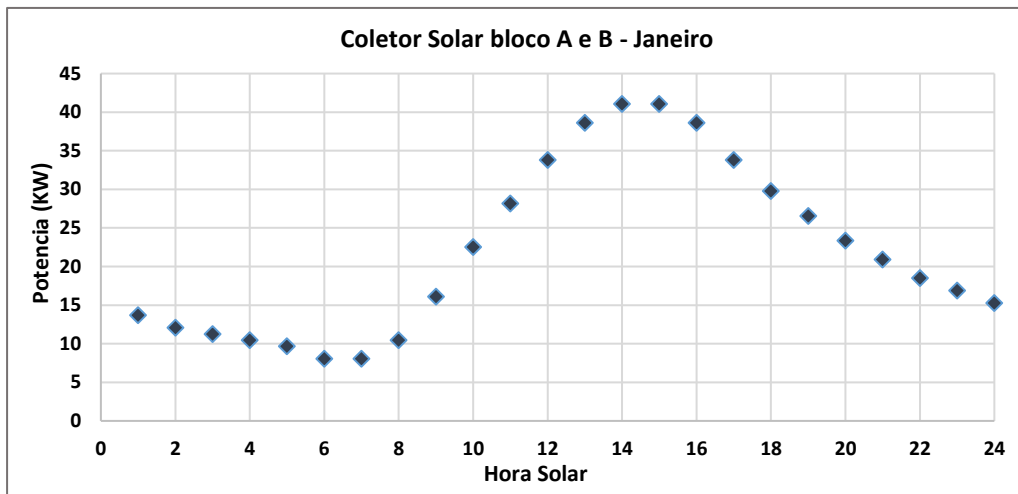


Figura 92 - Potência solar fornecida ao coletor A e B na estação de arrefecimento (mês de janeiro).

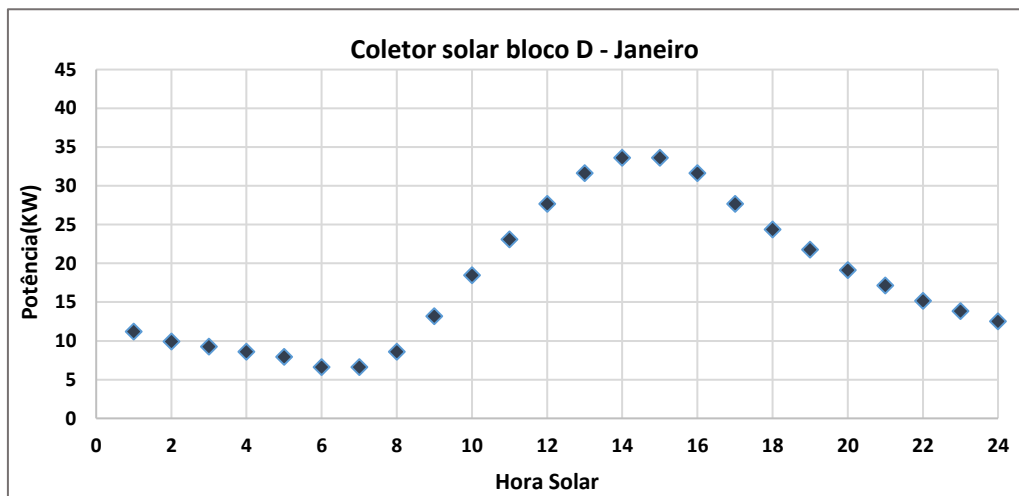


Figura 93- Potência solar fornecida ao coletor do bloco D no inverno em função da hora solar

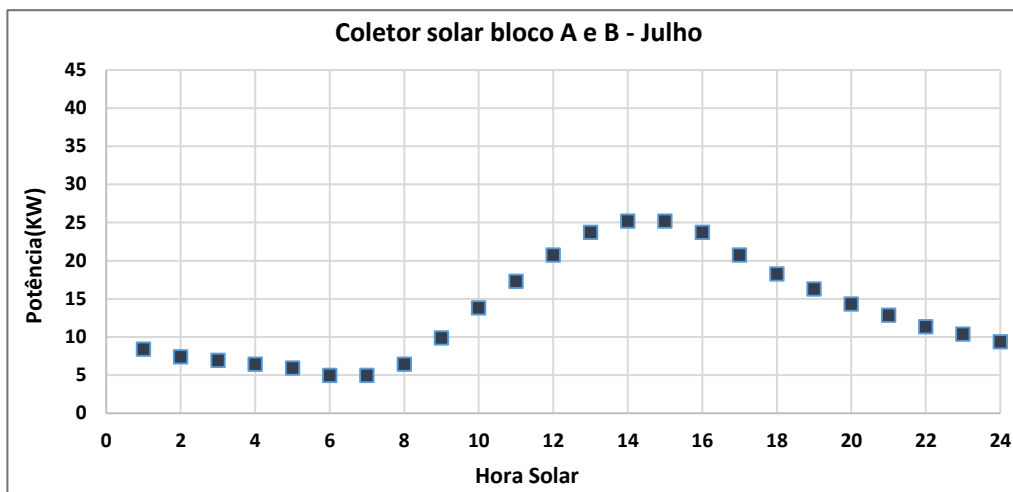


Figura 94 - Potência solar fornecida ao coletor do bloco A e B no verão em função da hora solar

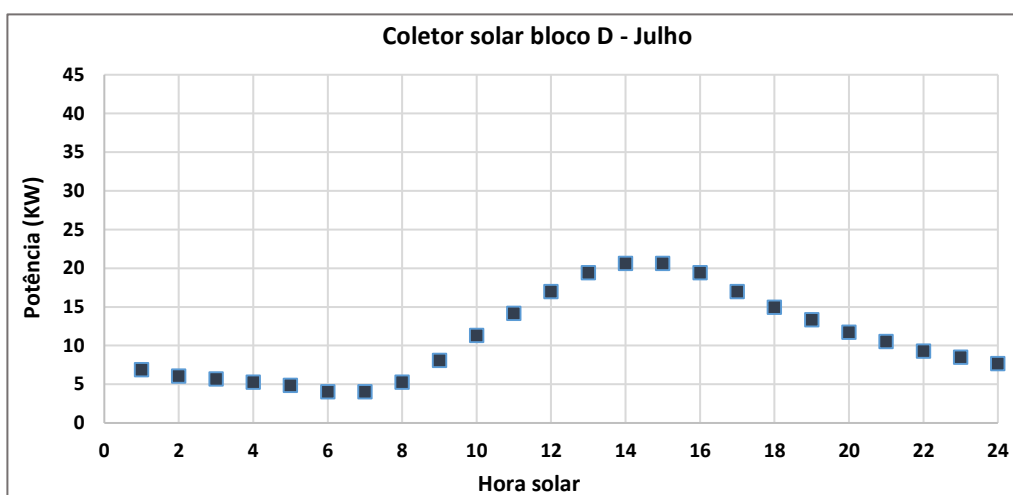


Figura 95 - Potência solar fornecida ao coletor do bloco D no verão em função da hora solar

Depois de uma análise aos gráficos anteriores (figuras 92 a 95) confirma-se que no inverno os valores do calor libertado pela parede são maiores, devido à orientação da parede (sul). É também as 15 h quando se verifica a maior libertação de calor, seja no inverno ou no verão, pois é a hora de máxima carga solar.

Capítulo 9 - Resultados finais

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos a partir das simulações efetuadas no caso de estudo. Após a aplicação de todos os conceitos e parâmetros estudados anteriormente no programa, procura-se neste capítulo obter os seguintes resultados:

- Identificação do efeito de recirculação nas aberturas de grande área.
- Renovações por hora dos espaços na estação de aquecimento e arrefecimento em função da intensidade do vento exterior, na hora do dia de máxima carga solar (14h) e mínima (7h).
- Diferenças de temperaturas nos espaços em função da intensidade do vento exterior nas horas do dia mencionadas no ponto anterior.
- Utilização de ventiladores para satisfazer as necessidades de renovação de ar e arrefecimento dos espaços.

9.1 Recirculação nas aberturas de grande área

Como explicado anteriormente no capítulo 5, é importante perceber o sentido do ar nas aberturas de grande área, dividindo-a em várias aberturas de menor área. No caso deste estudo existem três aberturas em que se justifica essa divisão (como explicado no capítulo 6): a abertura que divide o bloco A superior de B superior e as aberturas do bloco C superior com o bloco B superior e D superior. As duas figuras seguintes mostram essas aberturas divididas, o sentido e a velocidade do ar em cada uma para uma situação na estação de aquecimento às 14h e velocidade do vento exterior de 1 m/s.

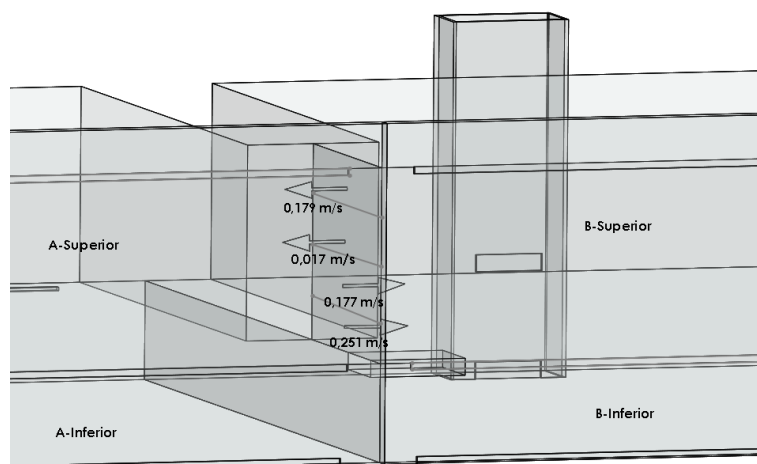


Figura 96 - Direções e velocidades do ar na abertura A - B bloco superior.

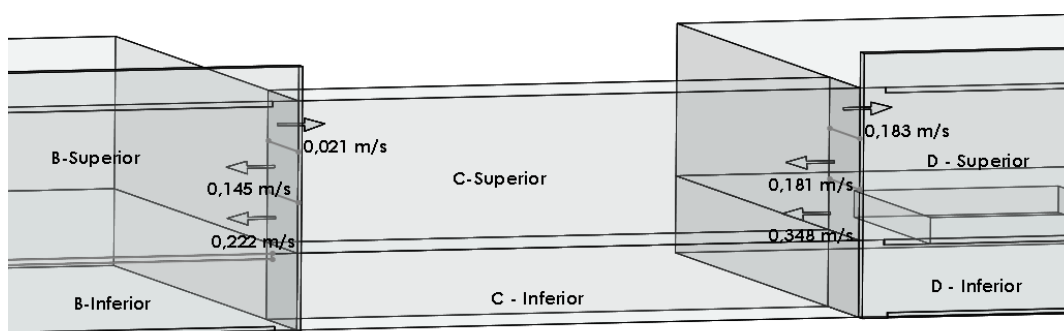


Figura 97-Direções e velocidades do ar na abertura B-C-D bloco superior.

Conclui-se que é importante continuar o estudo com as aberturas divididas, pois existe recirculação de ar tanto na abertura A-B, como nas B-C-D superior (nos blocos superiores). Adicionalmente, é de referir que a recirculação possa não existir ao longo do estudo, ou seja, o sentido do ar nas aberturas vai depender tanto da hora solar como da velocidade do vento exterior. Deste modo, deste exemplo pode-se concluir apenas que é importante considerar a divisão destas aberturas.

9.2. Renovações de ar – Inverno

Seguidamente apresenta-se o resultado que corresponde ao número de renovações por hora de cada espaço em função da intensidade do vento exterior para o edifício em estudo às 8h da manhã (hora a que se inicia a climatização do edifício, que abre ao público às 9h). Posteriormente, será apresentado o mesmo estudo à hora de carga máxima dos coletores solares, às 15h. A temperatura exterior é de 12°C e aplica-se no programa os restantes parâmetros anteriores. Consideraram-se seis salas importantes do edifício para este estudo, as salas do bloco A, B e D. Os resultados apresentados contribuem assim para ter um maior entendimento da em que gama de valores do vento para a mínima e máxima carga solar diária se conseguem obter as renovações mínimas de ar pretendidas, isto é, 3 renovações por hora.

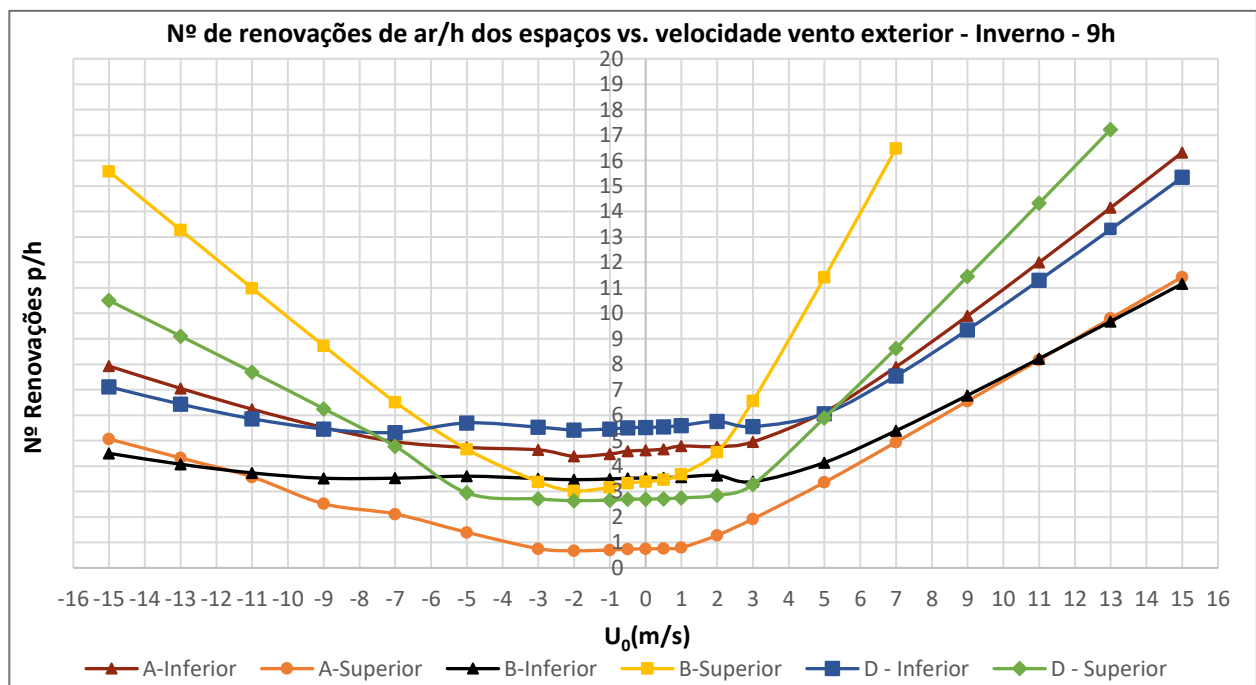


Figura 98 - Evolução do nº de renovações por hora nos espaços em função da velocidade do vento exterior para as 15h no inverno

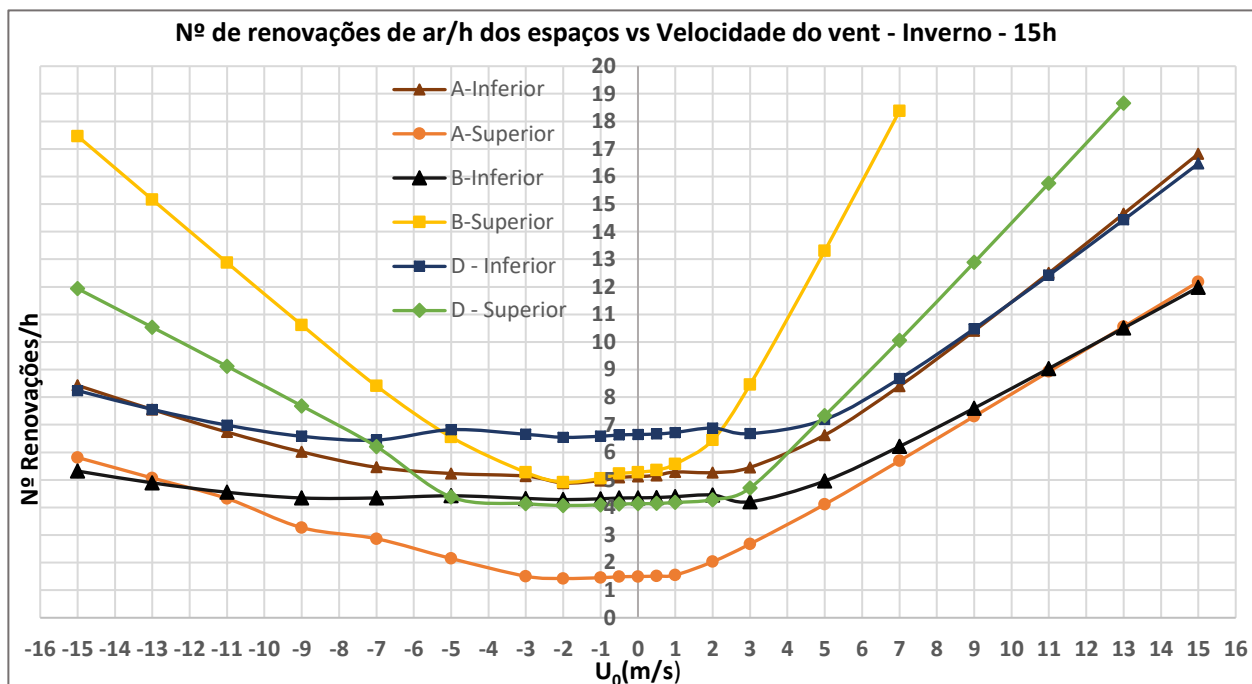


Figura 99 - Evolução do nº de renovações por hora nos espaços em função da velocidade do vento exterior para as 15h no inverno.

Analisando o primeiro gráfico observa-se que a sala A superior e D superior são as únicas onde existe dificuldade em satisfazer o número de renovações por hora tanto com o vento a norte como a sul. Com vento direcionado a norte (fachada principal) a sala A superior atinge as 3 renovações por hora quando $U_0 = 3,1$ m/s, já com vento em sentido oposto (sul) obtêm-se as 3 renovações mínimas depois de 8 m/s. Na sala D superior com vento direcionado a norte obtêm-se as 3 renovações por hora quando $U_0 = 2,8$ m/s (aproximadamente) e com vento direcionado a sul obtêm-se este número de renovações quando $U_0 = 5$ m/s.

Com o segundo gráfico (figura 99), verifica-se um aumento do número de renovações em todas as salas devido ao significativo aumento do calor nos coletores solares. Comparando todas as salas, o aumento mais importante ocorre na sala D superior, que passa a pertencer ao grupo das salas com nº de renovações aceitável em toda a gama de velocidades do vento.

Ainda que na maior parte das salas se consigam o número de renovações necessárias, existem casos onde este número é demasiado elevado, como no caso da sala B superior (por ser uma sala central que recebe o ar das outras salas e contém a chaminé de

extração). Como deixa de ser interessante chegar a valores muito elevados, não está representado o nº de renovações por hora até 15 m/s de vento exterior nessas salas (também para facilitar a leitura do gráfico). Assim em dias de maior intensidade de vento, com valores acima dos 8 m/s aproximadamente, deve-se evitar estas elevadas renovações de ar nas salas. A solução passaria por ter um sistema de fecho das aberturas exteriores programado para reduzir as suas áreas consoante a velocidade do vento.

9.3. Renovações de ar – Verão

De seguida apresentam-se os gráficos para o mesmo estudo anterior, mas referentes à estação de arrefecimento. Primeiramente apresenta-se o gráfico renovações por hora de cada sala em função da velocidade do vento exterior para as 8h e posteriormente para as 15h.

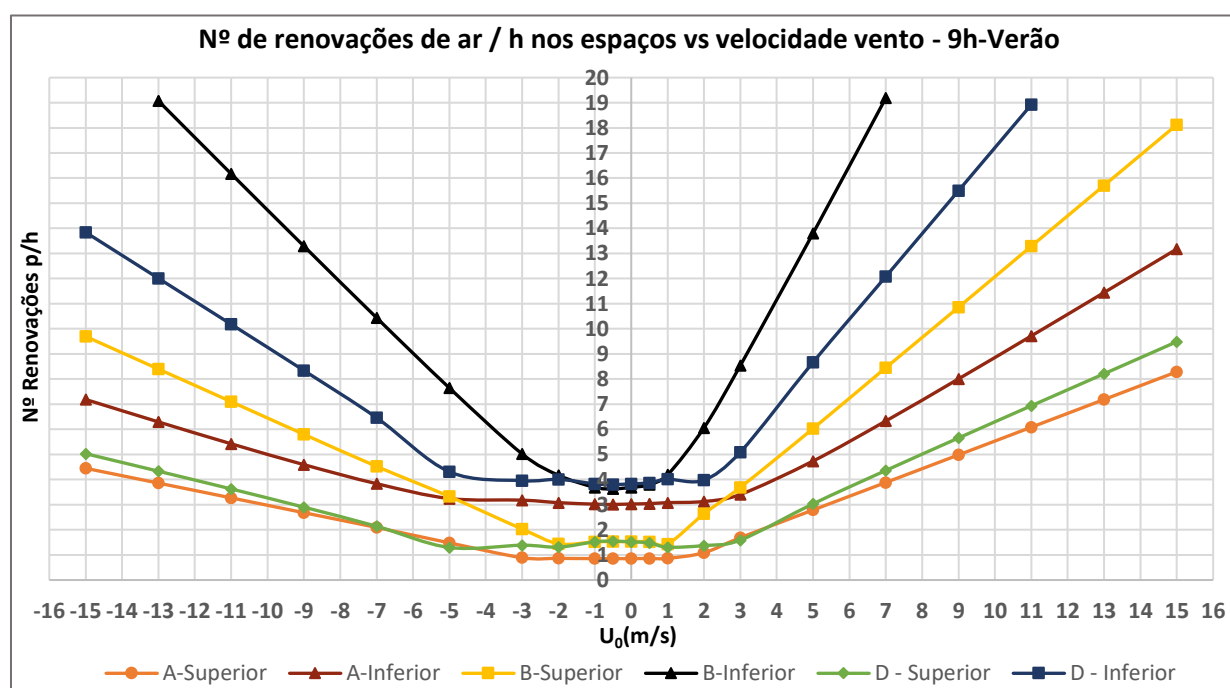


Figura 100 - Evolução do nº de renovações por hora nos espaços em função da velocidade do vento exterior para as h no verão

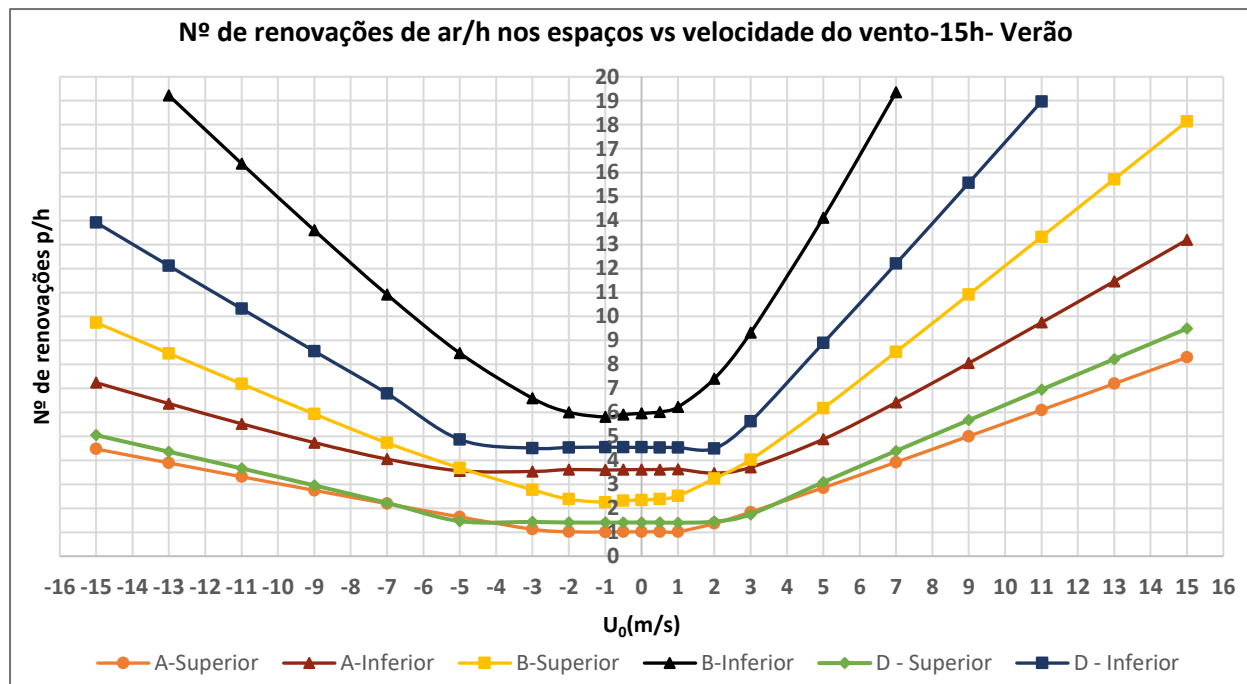


Figura 101 - Evolução do nº de renovações por hora nos espaços em função da velocidade do vento exterior para as 15h no verão

Pela análise dos dois gráficos verifica-se uma maior dificuldade em satisfazer o número de renovações por hora necessário (3 ren/h) do que no caso da estação de aquecimento (inverno), principalmente das salas B superior, D superior e A superior. Estas três salas só chegam ao valor de renovações de ar pretendido quando o vento exterior tem velocidade 1,8 m/s, 5 m/s e 5,5 m/s, respetivamente, quando o vento tem direção a fachada principal. E 3,3 m/s 9 m/s e 9,6 m/s, respetivamente, quando o vento tem direção a fachada traseira. Torna-se assim difícil satisfazer as necessidades de renovação de ar quando o vento tem direção sul principalmente nas salas D superior e A superior, por ser necessárias velocidades do vento consideradas altas e menos prováveis de acontecerem. Este resultado seria de esperar, uma vez que as salas superiores possuem volume muito elevado devido ao alto pé direito. Ainda assim a sala B superior consegue promover a renovação de ar mais facilmente do que as restantes salas, pois encontra-se centrada e recebe o ar das salas A e D superior para entrar no coletor solar (chaminé solar) e ser extraído

Como seria também de esperar, a sala B inferior consegue um elevado número de renovações por hora mesmo com velocidades do vento muito baixas, pois tal como a B superior, está centrada e tem menor volume comparativamente às salas do piso superior.

9.4. Solução Construtiva – Renovações de ar

De forma a resolver o problema da falta ou excesso de renovação de ar das salas, utilizou-se a sala A superior no inverno como modelo. Esta sala no inverno tem défice de renovações de ar por hora, o que pode ser resolvido com o uso de ventiladores. Contudo, existem salas que têm excesso de renovações de ar, este problema por sua vez pode ser resolvido diminuindo as áreas das aberturas. Este último problema é simulado também na sala A superior quando o vento atinge velocidades elevadas, servindo de exemplo para casos de outras salas que sofrem este défice mesmo com velocidades do vento muito baixas.

A solução passa por implementar o ventilador já estudado e dimensionado no capítulo 3 na abertura desta sala para a B superior. Optou-se por esta localização para o ventilador por ter área suficiente para a sua instalação, o que não acontece nas aberturas dos coletores solares.

É vantajoso neste caso estudar a diminuição do fecho da abertura do coletor solar para a sala A superior (pois a aberturas para a sala B superior é zona de passagem do edifício), de modo a obter sempre o mesmo número de renovações por hora em função do vento exterior e da velocidade rotativa do ventilador (rpm). Como resultado apresenta-se o seguinte gráfico.

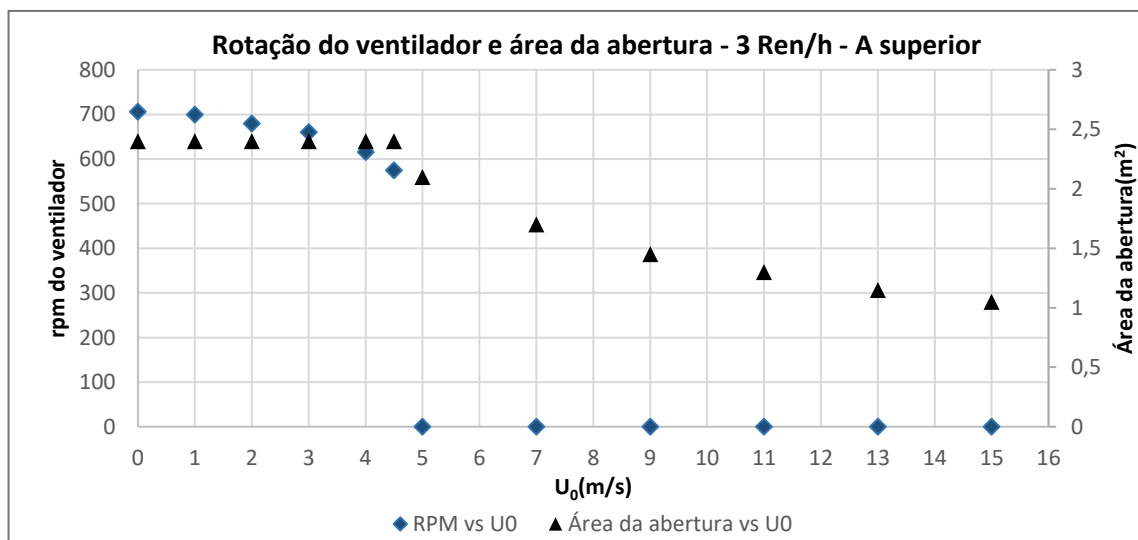


Figura 102 - Rotação do ventilador e área da abertura vs. velocidade do vento para obter 3 renovações/h

Através do gráfico conclui-se que o ventilador é necessário até se atingir uma velocidade crítica do vento de aproximadamente 4,2 m/s para se satisfazerem as necessidades de renovação de ar. A partir deste valor da velocidade do vento o ventilador pode

ser desligado e apenas diminuindo a área da abertura entre o espaço aquecido (coletor solar) e a sala A superior consegue-se manter o mesmo resultado para as renovações de ar.

9.5. Diferença de temperatura

Para estudar o efeito de aquecimento no edifício através dos coletores solares, escolheu-se a sala A inferior e D superior, de modo a estudar este efeito numa das salas dos dois pisos.

Como o programa apresenta os valores da diferença de temperatura entre a temperatura de projeto exterior (que seria a do interior sem libertação de calor no edifício) e a temperatura da sala com o aquecimento, foi necessário fazer simulações sem qualquer calor nos coletores solares de modo a perceber qual o ganho calorífico dado apenas pelos utentes e equipamentos, e qual o ganho dado apenas pelos coletores solares.

O objetivo desta fase é perceber o quão próximo se consegue estar da temperatura ideal interior, que se considera 20°C para o inverno e 25°C para o verão [35].

Apresentam-se em seguida os gráficos referentes à temperatura em cada uma destas salas no horário de funcionamento da climatização do edifício (8h-20h). Observam-se os valores atingidos apenas com o calor das máquinas e utentes, que se consideram constantes ao longo do dia, e os valores ao ser inserido o efeito do coletor solar. Apresenta-se também a temperatura ideal no interior, a variação da temperatura exterior ao longo do dia no caso do verão e a temperatura constante exterior considerada no inverno. É de notar que para este estudo foi considerada uma velocidade vento exterior 3 m/s (a mais provável no local do edifício em estudo).

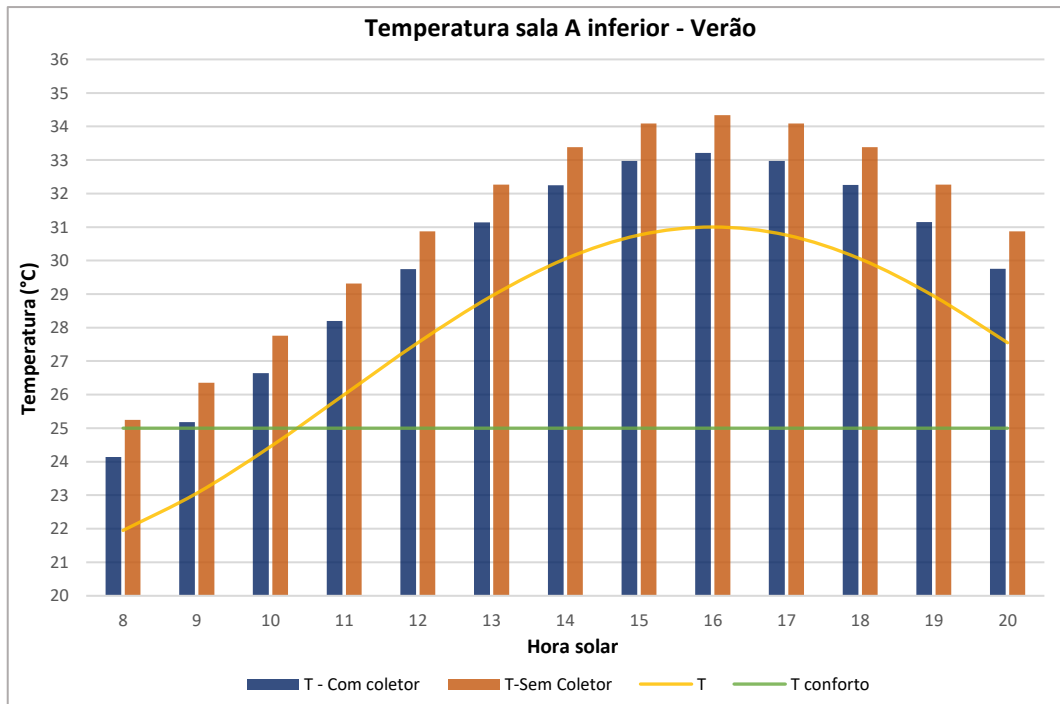


Figura 103 - Evolução da temperatura interior da sala A inferior durante o horário de funcionamento do edifício no verão.

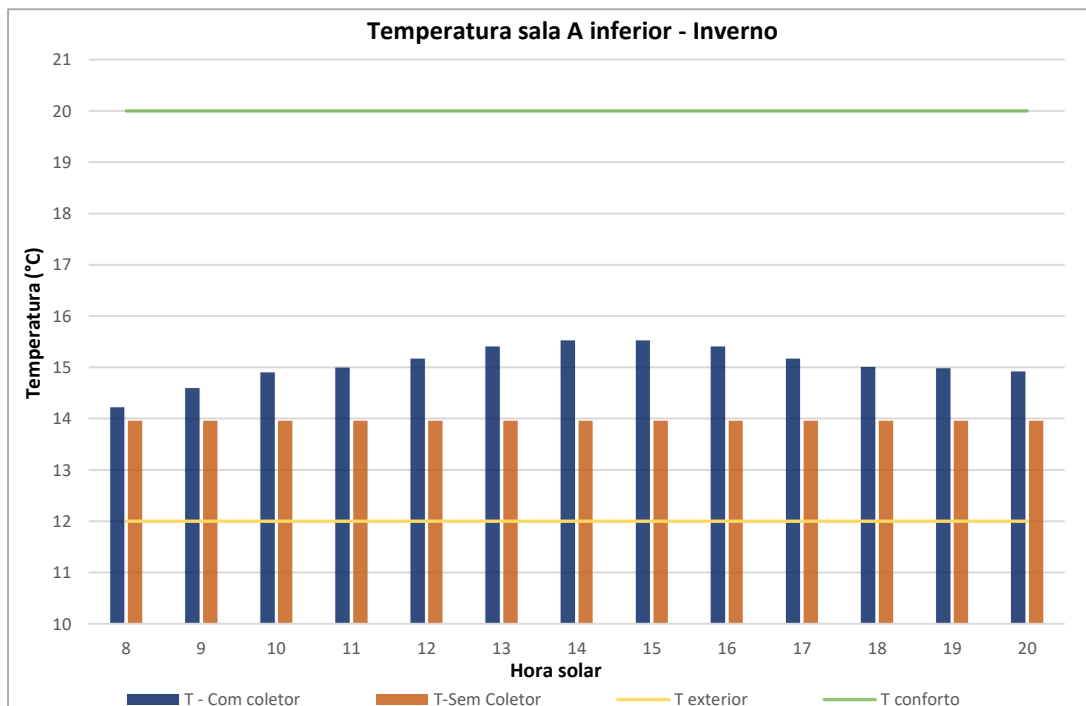


Figura 104 - Evolução da temperatura interior da sala A inferior durante o horário de funcionamento do edifício no inverno

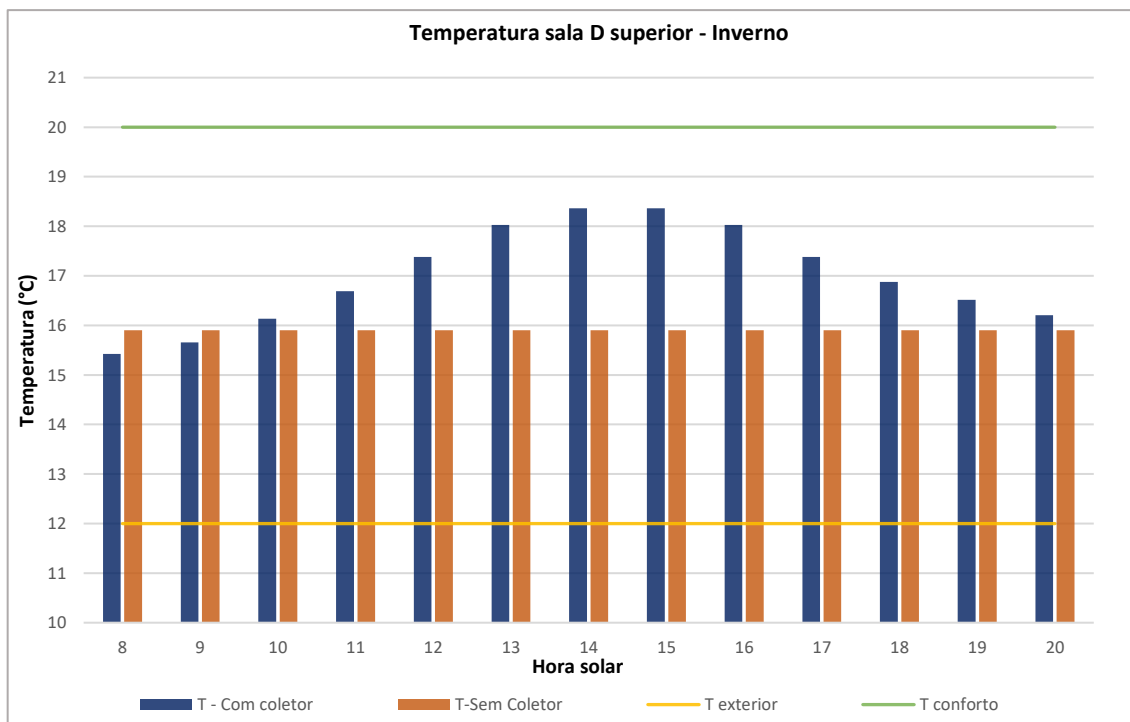


Figura 105 - Evolução da temperatura interior da sala D superior durante o horário de funcionamento do edifício no inverno

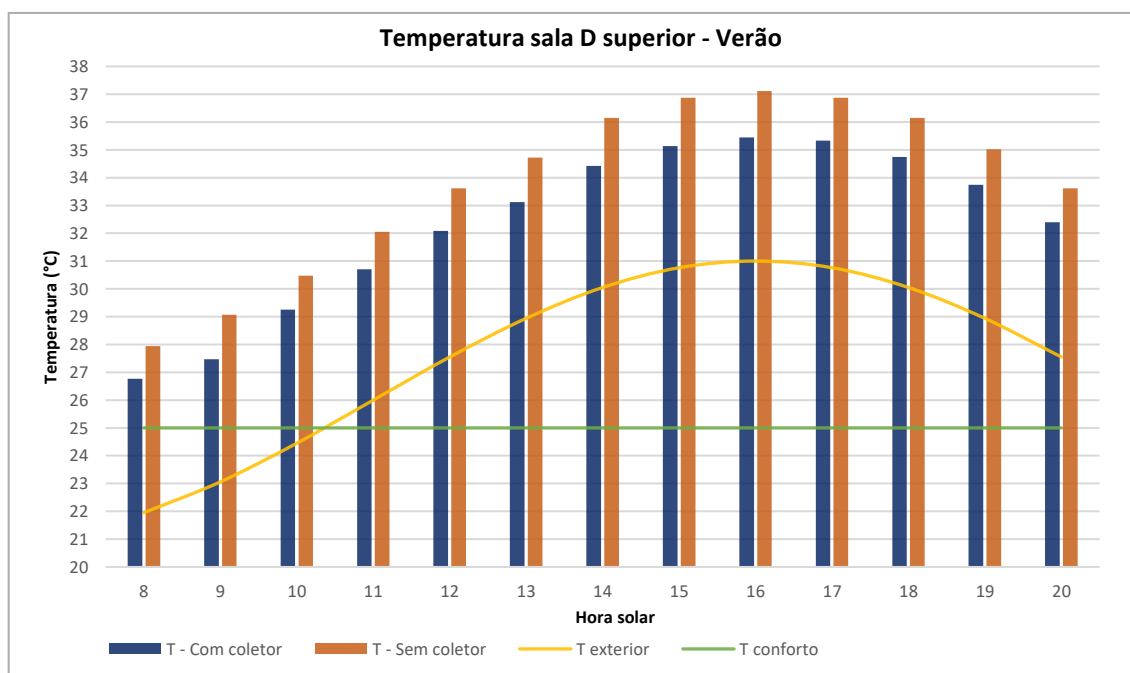


Figura 106 - Evolução da temperatura interior da sala D superior durante o horário de funcionamento do edifício no verão

Analisando o caso do verão, onde o objetivo é baixar o calor acumulado no edifício devido aos equipamentos e utentes ventilando as salas com ar exterior, verifica-se que na sala A inferior sem o coletor solar (que neste caso serve como chaminé solar), tem uma diferença de temperatura em relação ao exterior entre 2,5°C e 3,4°C ao longo do horário de funcionamento. Exemplificando, às 12h observa-se um aumento de calor na sala A inferior de 3,31°C em relação ao exterior, perfazendo uma temperatura interior de 30,86°C. Quando se utiliza o coletor solar a diferença de temperatura é de 2,19°C, ficando assim com uma temperatura interior de 29,74°C. Deste modo, é possível concluir que com este método se consegue baixar o aumento de temperatura no interior em 3,7 %.

Na mesma estação de arrefecimento, mas para a sala D superior verifica-se um maior aumento de temperatura em relação à sala anterior, sendo que este efeito se deve à receção do calor proveniente da sala D inferior devido à impulsão térmica. A sala D inferior é também a sala que mais calor liberta no edifício. Nesta sala verifica-se um aumento de temperatura sem o coletor solar entre 5,80°C e 6,10 °C durante o dia de funcionamento. Para fins comparativos, às 12h existe um aumento (em relação ao exterior) sem coletor de 6,06°C, ficando com temperatura interior 33,61°C. Enquanto que com o coletor solar tem-se um aumento de 4,53°C, ficando com temperatura interior 32,08°C, conseguindo-se uma redução de 4,6%.

Os dois últimos gráficos (Figura 104 e 105) são referentes à estação de aquecimento, onde o objetivo é conseguir aumentar a temperatura interior por ação dos coletores solares, e aproximar mais da temperatura de conforto. Começando por analisar a sala A inferior observa-se que sem coletor solar, apenas os equipamentos e utentes conseguem aumentar a temperatura do interior em relação ao exterior em 1,96 °C. Este valor permanece constante pois considera-se constante a temperatura exterior (12°C) e também o calor libertado no interior ao longo do dia de funcionamento. Quando entra em ação o coletor solar, este consegue um aumento de temperatura em relação ao exterior entre 2,22 (às 8h) e 3,53°C (às 15h).

O último gráfico corresponde à estação de aquecimento na sala D superior e pode-se concluir que existe um maior aquecimento dado pelas razões explicadas anteriormente para o caso da estação de arrefecimento nesta sala. Sem a utilização do coletor solar a temperatura interior sobe 3,9 °C em relação à temperatura exterior, chegando aos 15,9°C. Com a utilização do coletor solar tem-se valores de subida da temperatura compreendidos entre -0,48 (às 8h) e 6,36 (às 15h). Aquando da adição dos coletores, verifica-se uma descida na temperatura nas primeiras duas horas de funcionamento (8h e 9h). Uma possível explicação para este fenómeno é o fato de existir nesta sala elevada libertação de calor, que é ventilada nas horas iniciais com ar do coletor a uma menor temperatura arrefecendo o espaço. Depois destas horas existe aquecimento nos espaços que pode chegar

Capítulo 9 - Resultados finais

até aos 18,36°C (às 15h) devido ao calor nos coletores e também ao aquecimento da temperatura exterior ao longo do horário de funcionamento do edifício.

O seguinte gráfico mostra o arrefecimento e aquecimento em graus celsius que o sistema de climatização do edifício teria de satisfazer para se chegar à temperatura de conforto no verão e inverno, respetivamente, para estas as duas salas, sem e com coletores solares. Deste modo consegue-se perceber qual a ajuda energética deste modelo.

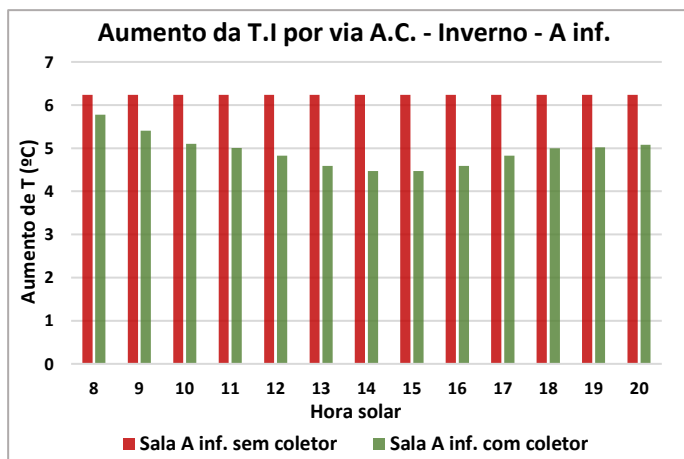


Figura 107 - Aumento da T.I. dado pelo sistema de climatização, com e sem coletor, para a sala A inferior no inverno.

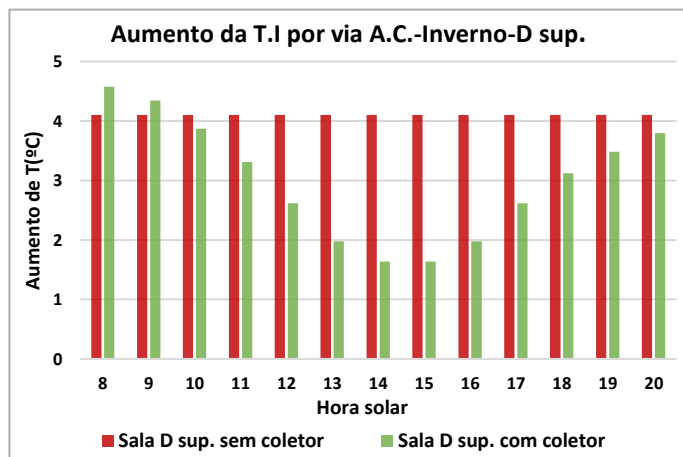


Figura 108 - Aumento da T.I. fornecido pelo sistema de climatização, com e sem coletor, para a sala D superior no inverno

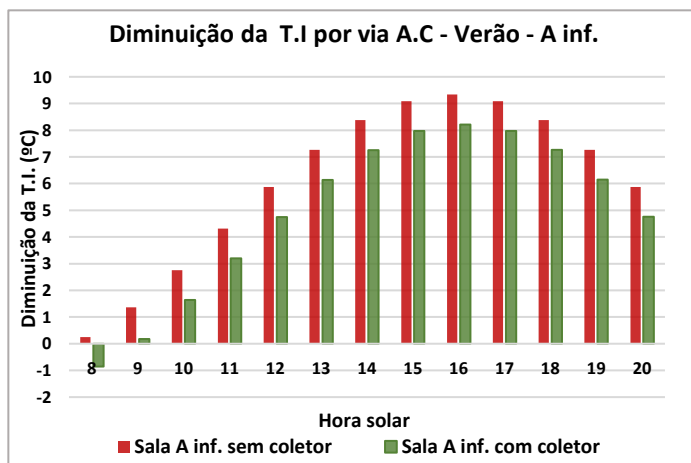


Figura 109 - Diminuição da T.I. dado pelo sistema de climatização, com e sem coletor, para a sala A inferior no verão.

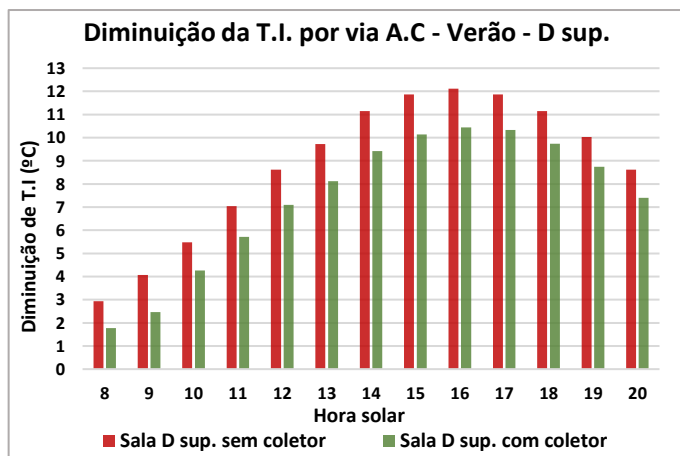


Figura 110 - Diminuição da T.I. dado pelo sistema de climatização, com e sem coletor, para a sala D superior no verão.

Percebe-se com estes últimos resultados que é no verão onde é preciso utilizar mais energia no sistema de climatização para se chegar à temperatura de conforto. No inverno, e com a ajuda do método aplicado, consegue-se baixar significativamente esta

9.5. Diferença de temperatura

energia, principalmente nas horas de carga solar máxima, sendo o caso da sala D superior nesta estação onde se nota a maior aproximação à temperatura de conforto, faltando apenas $1,6^{\circ}\text{C}$ para chegar aos 20°C nas horas de carga máxima, sem o coletor faltariam $4,1^{\circ}\text{C}$. Assim neste caso, consegue-se poupar cerca de 61% de energia para climatizar esta sala

Capítulo 10 – Conclusão e Desenvolvimentos Futuros

Este capítulo apresenta as principais conclusões do trabalho desenvolvido, discutindo-se os resultados obtidos. Apresenta também temas para trabalhos futuros relacionados com este trabalho e com o tema da ventilação natural em edifícios.

10.1 – Conclusões e síntese dos resultados obtidos

Uma das principais motivações que levou à realização deste trabalho foi a necessidade crescente nos dias de hoje em diminuir o consumo energético, reduzindo assim o impacto ambiental que a ele está associado. Começou-se por testar as capacidades do programa de cálculo utilizado e apresentar o que este consegue apresentar e estudar. Concluindo-se até aqui que a ventilação natural é bastante eficaz no que toca à necessidade de renovações de ar no edifício, estando esta relacionada diretamente com o número, áreas e tipos de aberturas; com o coeficiente de pressão; com a presença de chaminés no edifício; áreas e volumes das salas do edifício; calor libertado no interior, e claro, a velocidade e direção do vento exterior. Posteriormente estudou-se o efeito das chaminés no edifício, onde se conclui que com uma chaminé consegue-se que o ar entre sempre pela mesma fachada do edifício, aumentando o fluxo de ar por ventilação natural. Também se estudou a possibilidade de utilizar um extrator (ou insuflador) de ar ao implementar um ventilador no edifício, o que apenas se verificou necessário quando se estudam grandes volumes de salas interiores, sendo apenas utilizados para grandes edifícios, como o da Biblioteca da FCT/UNL.

Estudou-se posteriormente um modelo de aproveitamento do calor solar para se ventilar o edifício, seja apenas por impulsão térmica numa chaminé solar (no verão) ou mesmo introduzir o calor obtido num espaçamento entre vidro e parede do edifício para os espaços habitáveis, funcionado como coletor solar e ajudando no aquecimento no inverno. Obtida a equação e os valores que a parede liberta devido à inércia térmica conclui-se que é possível assim quantificar esse calor em Watts e introduzir no programa, no espaço referente ao coletor solar. Valor este que depende da estação do ano, orientação da parede, construção e localização do edifício.

Surgiu a necessidade de estudar todos estes aspetos num caso de estudo real, que foi o edifício da biblioteca da FCT. Para tal, modelou-se apenas o piso 1, 2 e 3, usando uma geometria aproximada de um caso real. Esta geometria apresenta aberturas de grande

dimensão nas separações das diferentes salas no edifício. Deste modo, estudou-se a possibilidade de existir recirculação de ar nestas aberturas e entre os espaços que a separam criando-se um método de divisão das aberturas. Conseguiu-se perceber que podem existir frequentes recirculações de ar quando existe libertação de calor nos espaços.

Com o objetivo principal de estudar os dois efeitos mais importante da ventilação natural neste edifício, a taxa de renovação de ar e a temperatura, avançou-se para o cálculo de todos os parâmetros de importância. Para tal finalidade, inseriu-se os parâmetros e a modelação do caso de estudo no programa e obtiveram-se resultados que permitiram começar por concluir que a ventilação natural consegue satisfazer as necessidades de renovação do ar interior para quase todas as salas. As salas que não conseguiram satisfazer totalmente este número foi a sala A superior no inverno e a sala A superior e D superior no verão. Uma possível explicação para esta conclusão é que são as salas do piso inferior que têm mais dificuldades em renovar o ar devido ao grande volume que possuem e a não estarem diretamente conectadas com a saída do ar para o exterior, como a as salas do bloco B. É importante não só obter um razoável numero de renovações de ar por hora como também é importante que este valor não ultrapasse um valor que deixa de conseguir satisfazer o conforto dos utentes, como é o caso das salas do bloco B. Estes dois problemas devido à taxa de renovação de ar podem ser atenuados com a utilização de ventiladores e fecho das aberturas, como se conclui com o caso de exemplo da sala A superior, onde foi implementada esta solução construtiva.

Por fim, estudou-se a temperatura do edifício, fazendo-se comparar a temperatura do exterior com a do interior, com e sem coletor solar, tanto para o inverno como para o verão. Ao analisar os resultados pode-se concluir que o calor libertado pelos utentes e máquinas afeta de forma significativa a temperatura de todas as salas do edifício. Este efeito é prejudicial no verão e favorável no inverno, desde que sempre se satisfaçam o número de renovações de ar por hora. É, portanto, no verão quando o sistema de climatização do edifício tem de consumir mais energia para se chegar à temperatura de conforto. Com a utilização do coletor solar nesta estação consegue-se ventilar o interior com o ar exterior, que mesmo estando a uma temperatura elevada, consegue baixar a temperatura até 4,6% no exemplo da sala D superior. Apesar de ser um valor baixo, é sempre favorável, pois este método está isento de custos e de utilização de energia.

Na estação de aquecimento (inverno) conseguem-se melhores resultados não só devido ao favorável calor libertado no interior, mas também devido à utilização de três coletores solares, nas fachadas de cada bloco, em vez no uma na fachada no bloco B (que serve como chaminé solar) no caso da estação de arrefecimento. Outro motivo é a temperatura exterior ser elevada e na maior parte das horas de funcionamento ultrapassar a temperatura de conforto.

Em suma, este tipo de projeto com coletores solares pode-se tornar bastante útil para reduzir o consumo elétrico de grandes edifícios no inverno, aproveitando assim fontes de energia renovável, natural e sem custos, a energia solar e eólica.

Projetos de ventilação natural, sem coletores, em edifícios como o da Biblioteca da FCT também podem ser bastante viáveis, pois pode-se concluir com o resultado deste trabalho que é possível atingir taxas de renovação de ar aceitáveis para a maior parte das salas em estudo, evitando assim boa parte da ventilação mecânica associada a gastos energéticos.

10.2 – Desenvolvimentos Futuros

Vários trabalhos futuros podem ser feitos de forma a melhorar e tornar mais eficiente a ventilação natural. O presente trabalho aborda de uma forma geral todo o tema, deixando de parte tópicos mais concretos e focados em certos pontos que também são importantes para melhorar todo o efeito da ventilação natural. Esses temas, que podem servir de estudos futuros são os seguintes:

- Desenvolver sistema que controlem o fecho das aberturas exteriores em função da velocidade do vento exterior, de forma a manter o mesmo número de renovações de ar por hora nos espaços.
- Projetar um sistema real do coletor solar de forma a estudar experimentalmente o seu efeito ao longo do dia e comparar os resultados do calor libertado pela parede com os resultados analíticos do presente trabalho.
- Prever qual seria o ganho energético e a poupança monetária do edifício da Biblioteca da FCT com a implementação deste modelo.
- Estudar o posicionamento dos ventiladores para os casos em que não se atingem o número de renovações por hora, de forma a manter constante o esse número em todas as salas.
- Estudar qual a área ideal dos coletores solares na estação de arrefecimento que permite ventilar o edifício e não aquecer demasiado por condução térmica nas paredes onde é colocado o coletor.

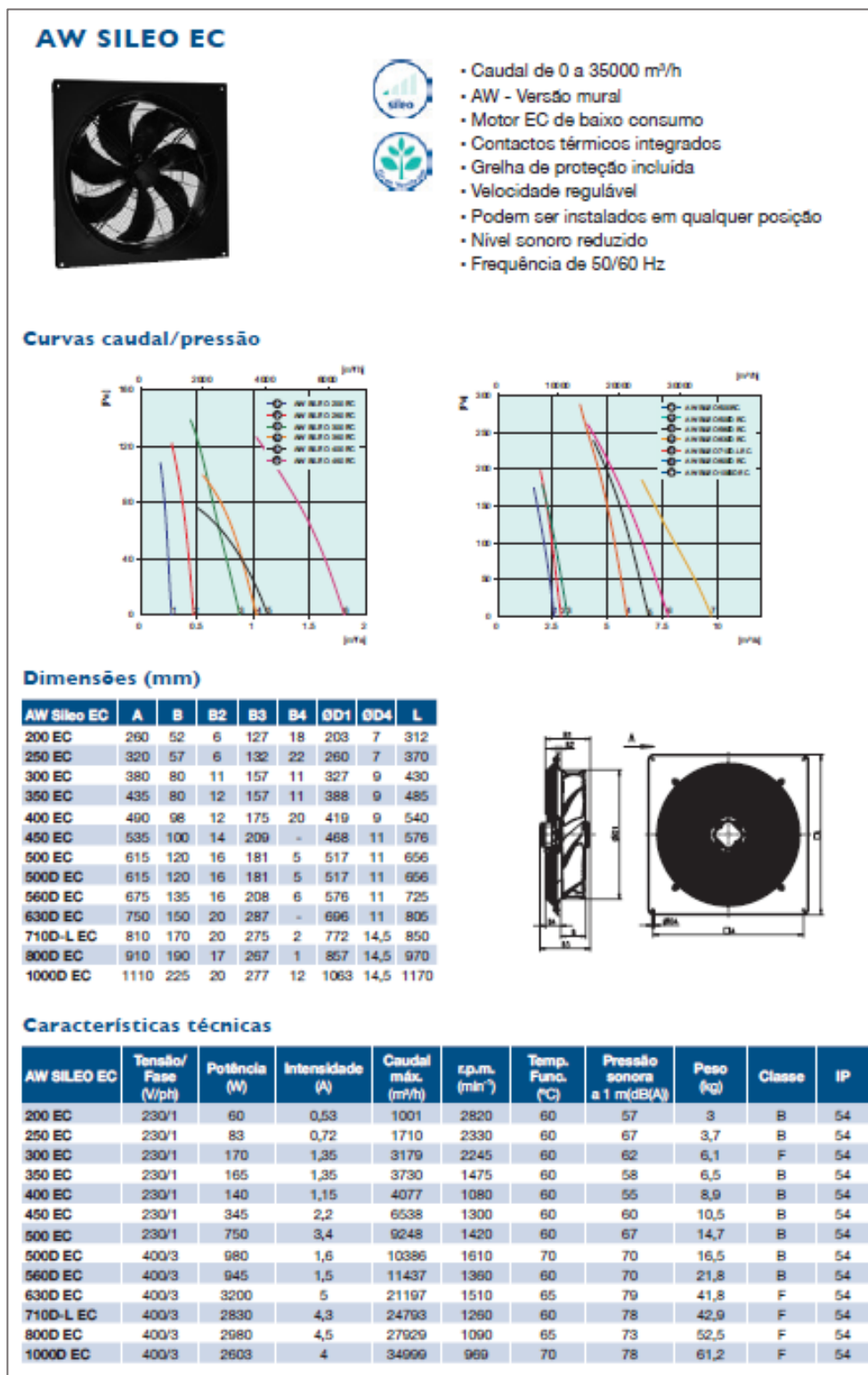
Referências

- [1] D. ; B. Saraiva, *Um programa de cálculo automático (PCA) de ventilação natural: Ventilfor*. Lisboa, 1985.
- [2] Gil-Baez, “Natural ventilation system in 21 st -century for near zero energy school buildings,” 2017.
- [3] G. Carrilho da Graça and P. Linden, “Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings,” *Build. Environ.*, vol. 107, pp. 263–273, 2016.
- [4] T. T. University, “The wind science and engineering (WISE) research center,” 2014.
- [5] T. Yang, “Natural ventilation in build Environment,” 2018.
- [6] F. M. da Silva, “Ventilação Natural – Acção do vento.”
- [7] M. B. Luther, “Centre, Thermal and ventilation performance of a natural ventilated sports hall within na aquatic,” 2013.
- [8] P. Smith, “Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos,” 2000.
- [9] “Designing Buildings Wiki.” [Online]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Cross_ventilation.
- [10] “Projeteeee.” [Online]. Available: <http://projeteeee.mma.gov.br/estrategia/ventilacao-natural>.
- [11] J. D. Delgado, “Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate of a two-storey build communacating with the outside environment by a chimney,” 1996.
- [12] S. de B. Araújo, “Hidráulicas, Apontamentos de Máquinas.” 1997.
- [13] A. B. António Rodrigues, António da Piedade, *Térmica de Edifícios*, 1º Edição. Lisboa, 2009.
- [14] “System Air.” [Online]. Available: https://www.systemair.com/globalassets/downloads/leaflets-and-catalogues/portugal/catalogo-geral_2014_15.pdf.
- [15] M. Almeida, “Thermal inertia walls in portuguese traditional rock for passive solar heating of buildings,” 2016.
- [16] J. P. Holman, “Heat Transfer (10th Edition),” *McGraw-Hill Co.*, 2010.
- [17] C. A. C. Company, *Handbook of Air Conditioning System Design*. New York, 1980.
- [18] “Academia de Astrologia.” [Online]. Available: <http://www.academiadeastrologia.com/recursos/coordenadas/portugal.htm>.
- [19] D. Amaro, “Gestão Eficiente da Energia Eléctrica no Edifício da Biblioteca da FCT e Negociação de um Novo Contrato em Mercado Liberalizado,” FCT/UNL, 2015.
- [20] “Faculdade de Ciências e Tecnologias - UNL.” [Online]. Available: www.fct.unl.pt.

- [21] Rodrigo Rodrigue; Pina dos Santos, *Coeficientes de transmissão térmica de elementos opacos da envolvente dos edifícios*. 2009.
- [22] LNEC, “Especificação das características de desempenho térmico de janelas, portas e fachadas leves com vidro,” 2013.
- [23] Antonio José Santos, *AVAC, Um Manual de Apoio*, 1ª. Porto, 2017.
- [24] N. Pinheiro, E. Silva, R. Carvalho, T. Lima, and H. D. Costa, “MEDIÇÃO DA CARGA TÉRMICA LIBERADA POR LÂMPADAS INCENDESCENTES MEDIDA EM UM CALORÍMETRO.”
- [25] T. Mohamad, Ocloñ, “Trombe Wall Utilization for Cold and Hot Climate Conditions,” 2019.
- [26] NP-EN-1991-1-4, “Eurocódigo 1, Parte 4 - Acções do vento,” pp. 1–162, 2010.
- [27] “DIÁRIO DA REPÚBLICA—I SÉRIE-A - Nº67,” pp. 2468–2513.
- [28] Instituto Nacional de Meteorologia Civil (LNEC), “Temperaturas Exteriores de Projeto e Número de Graus-Dia,” Lisboa, 1989.
- [29] “meteoblue.” [Online]. Available: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/weatherarchive/lisboa_portugal_2267057.
- [30] J. Silva, “A ventilação natural como melhoria do desempenho energético de edifícios residenciais,” FCT/UNL, 2012.
- [31] “MegaClima.” [Online]. Available: <https://www.megaclima.pt/tabela-renovacao-ar.php>.
- [32] P. Costa, “Atlas do Potencial Eólico para Portugal Continental,” FCUNL, 2004.
- [33] D. C. Vaz, “Apontamentos Aulas Energia e Ambiente.” 2008.
- [34] “WindFinder.” [Online]. Available: https://pt.windfinder.com/windstatistics/almada_colegio_campo_de_flores.
- [35] “Galp Energia.” [Online]. Available: <http://www.galpenergia.com/PT/ProdutosServicos/GasNatural/Paginas/Eficiencia-energetica.aspx>.

Anexos

Anexo A – Catálogo e curva do ventilador AW SILEO EC



Anexo B – Máximo ganhos solares através do vidro ordinário.

TABLA 6. MÁXIMAS APORTACIONES SOLARES A TRAVÉS DE CRISTAL SENCILLO *												
kcal/ (hora) (m²)												
LATITUD NORTE	MES	ORIENTACIÓN (LATITUD NORTE)									MES	LATITUD SUR
		N**	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Horiz.		
0°	Junio	160	423	398	113	38	113	398	423	612	Diciembre	0°
	Julio y Mayo	130	414	412	141	38	141	412	414	631	Nov. y Enero	
	Agosto y Abril	67	382	442	214	38	214	442	382	664	Oct. y Febrero	
	Sept. y Marzo	27	320	452	320	38	320	452	320	678	Sept. y Marzo	
	Oct. y Febrero	27	214	442	382	92	382	442	214	664	Agosto y Abril	
	Nov. y Enero	27	141	412	414	181	414	412	141	631	Julio y Mayo	
	Diciembre	27	113	398	423	222	423	398	113	612	Junio	
10°	Junio	108	414	420	149	38	149	420	414	659	Diciembre	10°
	Julio y Mayo	81	401	428	179	38	179	428	401	669	Nov. y Enero	
	Agosto y Abril	35	352	442	254	38	254	442	352	678	Oct. y Febrero	
	Sept. y Marzo	27	279	444	344	75	344	444	279	669	Sept. y Marzo	
	Oct. y Febrero	27	179	420	404	198	404	420	179	623	Agosto y Abril	
	Nov. y Enero	24	100	387	436	287	273	387	100	569	Julio y Mayo	
	Diciembre	24	75	371	442	324	442	371	75	547	Junio	
20°	Junio	70	417	433	198	38	198	433	417	678	Diciembre	20°
	Julio y Mayo	51	374	442	230	38	230	442	374	680	Nov. y Enero	
	Agosto y Abril	29	320	447	306	70	306	447	320	669	Oct. y Febrero	
	Sept. y Marzo	27	235	442	379	176	379	442	235	631	Sept. y Marzo	
	Oct. y Febrero	24	141	398	433	301	433	398	141	564	Agosto y Abril	
	Nov. y Enero	21	70	347	444	382	444	347	70	488	Julio y Mayo	
	Diciembre	21	48	328	452	404	452	328	48	461	Junio	
30°	Junio	54	377	436	244	57	244	436	377	678	Diciembre	30°
	Julio y Mayo	43	355	444	271	81	271	444	355	667	Nov. y Enero	
	Agosto y Abril	29	292	447	349	170	349	447	292	637	Oct. y Febrero	
	Sept. y Marzo	24	244	428	412	284	412	428	244	574	Sept. y Marzo	
	Oct. y Febrero	21	105	366	442	393	442	366	105	485	Agosto y Abril	
	Nov. y Enero	19	43	314	439	431	439	314	43	393	Julio y Mayo	
	Diciembre	16	32	284	439	442	439	284	32	355	Junio	
40°	Junio	46	360	439	301	146	301	439	360	642	Diciembre	40°
	Julio y Mayo	40	344	444	339	187	339	444	344	631	Nov. y Enero	
	Agosto y Abril	29	276	439	395	276	395	439	276	580	Oct. y Febrero	
	Sept. y Marzo	24	157	404	439	379	439	404	157	496	Sept. y Marzo	
	Oct. y Febrero	19	94	330	442	439	442	330	94	349	Agosto y Abril	
	Nov. y Enero	13	32	271	423	450	423	271	32	279	Julio y Mayo	
	Diciembre	13	27	233	401	447	401	233	27	230	Junio	
50°	Junio	43	341	444	366	252	366	444	341	596	Diciembre	50°
	Julio y Mayo	38	317	442	387	287	387	442	317	572	Nov. y Enero	
	Agosto y Abril	29	254	428	425	374	425	428	254	501	Oct. y Febrero	
	Sept. y Marzo	21	157	374	442	428	442	374	157	401	Sept. y Marzo	
	Oct. y Febrero	13	78	284	425	452	425	284	78	254	Agosto y Abril	
	Nov. y Enero	10	24	173	344	414	344	173	24	143	Julio y Mayo	
	Diciembre	8	19	127	314	382	314	127	19	108	Junio	
		S	SE	E	NE	N	NO	O	SO	Horiz.		
ORIENTACIÓN (LATITUD SUR)												
Coeficiente de corrección	Marco metálico o ningún marco x 1/0,85 ó 1,17	Limpidez - 15 % máx.		Altitud + 0,7 % por 300 m		Punto de rocío superior a 19,5° C - 5 % por 4° C		Punto de rocío inferior a 19,5° C + 5 % por 14° C		Latitud Sur Dic. o Enero + 7 %		
* Valores extraídos de la Tabla 15.												
** Las aportaciones para los cristales orientados al norte (Latitud Norte) o al sur (Latitud Sur) se constituyen principalmente de radiación difundida, la cual es sensiblemente constante durante todo el día. Los valores indicados son promedios tomados sobre 12 horas (de 6 a 18 horas). Los factores de almacenamiento en las Tablas 7 hasta 11 suponen que las aportaciones solares sobre orientaciones Norte (o Sur) son constantes, y se emplean en consecuencia los mismos factores que para el valor lumínico.												

Anexo C – Factores de inercia térmica da construção devido à insulação através do vidro.

TABLA 8. FACTORES DE ALMACENAMIENTO SOBRE CARGA TÉRMICA, APORTACIONES SOLARES A TRAVÉS DE VIDRIO

Con vidrio descubierto o con elementos de sombra externos*
Funcionamiento de 24 horas diarias, Temperatura interior constante**

ORIENTACIÓN (Latitud Norte)	PESO(***) (kg por m ² de super ^{ficie} de suelo)	HORA SOLAR																								ORIENTACIÓN (Latitud Sur)					
		MAÑANA												TARDE													MAÑANA				
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5						
NE	750 y más 500 150	0,17 0,19 0,31	0,27 0,31 0,56	0,33 0,38 0,65	0,33 0,39 0,61	0,31 0,36 0,46	0,29 0,34 0,33	0,27 0,27 0,26	0,25 0,24 0,21	0,23 0,22 0,18	0,22 0,21 0,16	0,20 0,19 0,14	0,19 0,17 0,12	0,17 0,16 0,09	0,15 0,14 0,06	0,14 0,12 0,04	0,12 0,10 0,03	0,11 0,07 0,02	0,10 0,08 0,01	0,09 0,07 0,01	0,08 0,06 0,01	0,07 0,05 0,01	0,07 0,05 0,01	0,06 0,04 0,01	SE						
E	750 y más 500 150	0,16 0,16 0,27	0,26 0,29 0,50	0,34 0,40 0,67	0,39 0,46 0,73	0,40 0,46 0,68	0,38 0,42 0,53	0,34 0,36 0,38	0,30 0,31 0,27	0,28 0,25 0,22	0,26 0,23 0,18	0,23 0,20 0,15	0,22 0,20 0,12	0,20 0,18 0,09	0,18 0,15 0,06	0,16 0,14 0,04	0,14 0,12 0,03	0,13 0,11 0,02	0,12 0,10 0,01	0,10 0,08 0,01	0,09 0,08 0,01	0,08 0,06 0,01	0,08 0,06 0,01	0,07 0,05 0,01	0,06 0,04 0,01	E					
SE	750 y más 500 150	0,08 0,05 0	0,14 0,12 0,18	0,22 0,23 0,40	0,31 0,35 0,59	0,38 0,44 0,72	0,43 0,49 0,77	0,44 0,51 0,72	0,43 0,47 0,60	0,39 0,41 0,44	0,35 0,36 0,32	0,32 0,31 0,23	0,29 0,27 0,18	0,26 0,24 0,14	0,23 0,21 0,09	0,21 0,18 0,07	0,19 0,16 0,05	0,16 0,14 0,03	0,15 0,12 0,02	0,13 0,10 0,01	0,12 0,09 0,01	0,11 0,08 0,01	0,10 0,08 0,01	0,09 0,06 0,01	0,08 0,06 0,01	0,08 0,06 0,01	NE				
S	750 y más 500 150	0,10 0,07 0	0,10 0,06 0	0,13 0,12 0,12	0,20 0,20 0,29	0,28 0,30 0,48	0,35 0,39 0,64	0,42 0,48 0,75	0,48 0,54 0,82	0,51 0,56 0,81	0,51 0,53 0,75	0,48 0,45 0,61	0,42 0,37 0,42	0,37 0,31 0,19	0,33 0,27 0,13	0,29 0,23 0,09	0,26 0,20 0,06	0,23 0,18 0,04	0,21 0,16 0,03	0,19 0,14 0,02	0,17 0,14 0,01	0,15 0,12 0,01	0,14 0,12 0,01	0,13 0,11 0,01	0,12 0,10 0,01	0,12 0,08 0	N				
SO	750 y más 500 150	0,11 0,09 0,02	0,10 0,09 0,03	0,10 0,08 0,05	0,10 0,09 0,06	0,10 0,09 0,08	0,14 0,14 0,12	0,21 0,22 0,34	0,29 0,31 0,53	0,36 0,42 0,68	0,43 0,50 0,78	0,47 0,53 0,78	0,46 0,51 0,68	0,40 0,44 0,46	0,34 0,35 0,29	0,30 0,29 0,20	0,27 0,24 0,14	0,24 0,22 0,09	0,22 0,19 0,07	0,20 0,17 0,05	0,18 0,15 0,03	0,16 0,13 0,02	0,14 0,12 0,02	0,13 0,11 0,02	0,12 0,11 0,01	0,12 0,09 0,01	NO				
O	750 y más 500 150	0,12 0,09 0,02	0,11 0,09 0,03	0,11 0,09 0,05	0,10 0,09 0,06	0,10 0,09 0,07	0,10 0,10 0,08	0,13 0,12 0,08	0,19 0,19 0,14	0,27 0,30 0,29	0,34 0,40 0,46	0,42 0,48 0,67	0,44 0,51 0,76	0,38 0,42 0,75	0,33 0,35 0,53	0,29 0,30 0,22	0,26 0,25 0,15	0,23 0,22 0,11	0,21 0,19 0,08	0,18 0,16 0,08	0,16 0,14 0,05	0,15 0,13 0,04	0,13 0,11 0,03	0,12 0,11 0,02	0,12 0,11 0,01	0,12 0,09 0,01	O				
NO	750 y más 500 150	0,10 0,08 0,02	0,10 0,09 0,04	0,10 0,09 0,05	0,10 0,09 0,07	0,10 0,09 0,08	0,10 0,09 0,09	0,10 0,10 0,10	0,12 0,11 0,13	0,17 0,19 0,27	0,25 0,29 0,48	0,34 0,40 0,65	0,39 0,44 0,73	0,34 0,40 0,69	0,29 0,32 0,49	0,26 0,24 0,31	0,23 0,22 0,16	0,20 0,19 0,10	0,18 0,16 0,07	0,16 0,14 0,03	0,14 0,13 0,04	0,13 0,11 0,03	0,12 0,11 0,02	0,10 0,10 0,02	0,10 0,08 0,01	NO					
N y sombra	750 y más 500 150	0,16 0,11 0	0,23 0,33 0,48	0,33 0,44 0,66	0,41 0,51 0,66	0,47 0,57 0,76	0,53 0,62 0,87	0,57 0,66 0,91	0,61 0,70 0,93	0,66 0,74 0,95	0,69 0,76 0,97	0,72 0,79 0,98	0,74 0,80 0,98	0,59 0,60 0,52	0,52 0,51 0,34	0,46 0,44 0,24	0,42 0,37 0,16	0,37 0,32 0,11	0,34 0,29 0,07	0,31 0,27 0,05	0,27 0,23 0,04	0,25 0,21 0,02	0,23 0,21 0,02	0,21 0,18 0,01	0,17 0,16 0,01	0,17 0,16 0,01	N y sombra				

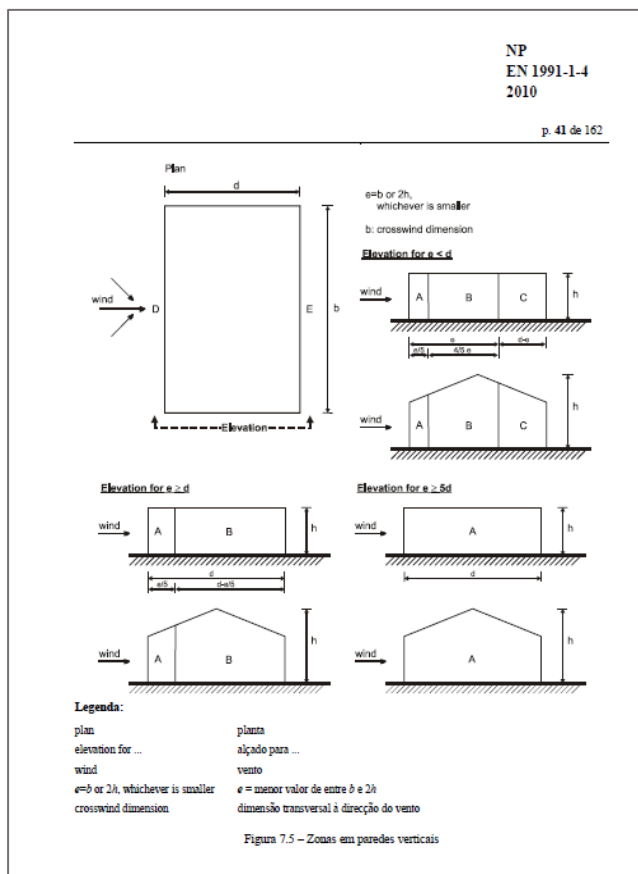
Anexo D – Factores total de ganho solar através do vidro consoante o tipo e espessura do vidro.

TABLA 16. FACTORES TOTALES DE GANANCIA SOLAR A TRAVÉS DEL VIDRIO
(coeficientes globales de insolación con o sin dispositivo de sombra o pantalla) *

Aplicar estos coeficientes a los valores de las tablas 6 y 15
Velocidad del viento 8 km/h. Ángulo de incidencia 30°. Con máxima sombra de persiana

TIPO DE VIDRIO	SIN PERSIANA O PANTALLA	PERSIANAS VENECIANAS INTERIORES Listones horizontales o verticales inclinados 45° O CORTINAS DE TELA			PERSIANAS VENECIANAS EXTERIORES Listones horizontales inclinados 45°		PERSIANA EXTERIOR Listones inclinados 17° (horizontales)		CORTINA EXTERIOR DE TELA Circulación de aire arriba y lateralmente	
		Color claro	Color medio	Color oscuro	Color claro	Exterior claro Interior oscuro	Color medio	Color oscuro	Color claro	Color medio u oscuro
VIDRIO SENCILLO ORDINARIO	1,00	0,56	0,65	0,75	0,15	0,13	0,22	0,15	0,20	0,25
VIDRIO SENCILLO 6 mm	0,94	0,56	0,65	0,74	0,14	0,12	0,21	0,14	0,19	0,24
VIDRIO ABSORBENTE										
Coefficiente de absorción 0,40 a 0,48	0,80	0,56	0,62	0,72	0,12	0,11	0,18	0,12	0,16	0,20
Coefficiente de absorción 0,48 a 0,56	0,73	0,53	0,59	0,62	0,11	0,10	0,16	0,11	0,15	0,18
Coefficiente de absorción 0,56 a 0,70	0,62	0,51	0,54	0,56	0,10	0,10	0,14	0,10	0,12	0,16
VIDRIO DOBLE										
Vidrios ordinarios	0,90	0,54	0,61	0,67	0,14	0,12	0,20	0,14	0,18	0,22
Vidrios de 6 mm	0,80	0,52	0,59	0,65	0,12	0,11	0,18	0,12	0,16	0,20
Vidrio interior ordinario										
Vidrio ext. absorbente de 0,48 a 0,56	0,52	0,36	0,39	0,43	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,13
Vidrio interior de 6 mm										
Vidrio ext. absorbente de 0,48 a 0,56	0,50	0,36	0,39	0,43	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,12
VIDRIO TRIPLE										
Vidrio ordinario	0,83	0,48	0,56	0,64	0,12	0,11	0,18	0,12	0,16	0,20
Vidrio de 6 mm	0,69	0,47	0,52	0,57	0,10	0,10	0,15	0,10	0,14	0,17
VIDRIO PINTADO										
Color claro	0,28									
Color medio	0,39									
Color oscuro	0,50									
VIDRIO DE COLOR										
Ambar	0,70									
Roja oscura	0,56									
Azul	0,60									
Gris	0,32									
Gris-Verde	0,46									
Opalescente claro	0,43									
Opalescente oscuro	0,37									

Anexo E – Valores dos coeficientes de pressão consoante a geometria do edifício.



NP
EN 1991-1-4
2010

p. 42 de 162

NOTA 1: Os valores de $c_{pe,10}$ e de $c_{pe,1}$ poderão ser fornecidos no Anexo Nacional. Os valores recomendados são indicados no Quadro 7.1, em função da relação h/d . Para valores intermédios de h/d , poderá ser efectuada uma interpolação linear. Os valores do Quadro 7.1 também são aplicáveis às paredes de edifícios com coberturas inclinadas, tais como coberturas de duas vertentes e de uma vertente.

Quadro 7.1 – Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular

Zona	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

NOTA 2: Para edifícios com $h/d > 5$, o carregamento total devido ao vento poderá basear-se no disposto em 7.6 a 7.8 e em 7.9.2.

Anexos

Anexo F – Distribuição dos concelhos de Portugal continental segundo as zonas climáticas e correspondentes dados climáticos de referência

Concelho	Zona climática de Inverno	Número de graus-dias (GD) (°C.dias)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona climática de Verão	Temperatura externa do projecto (°C)	Amplitude térmica (°C)
Abrantes	I ₂	1 630	6	V ₃	36	17
Águeda	I ₁	1 490	6,7	V ₁	31	12
Aguiar da Beira	I ₃	2 430	7,3	V ₂	32	13
Alandroal	I ₁	1 320	6	V ₃	36	17
Albergaria-a-Velha	I ₁	1 470	6,3	V ₁	30	11
Albufeira	I ₁	1 130	5,3	V ₂	33	14
Alcácer do Sal	I ₁	1 240	5,3	V ₃	35	16
Alcanena	I ₂	1 680	6	V ₂	33	14
Alcobaça	I ₂	1 640	6,3	V ₁	29	10
Alcochete	I ₁	1 150	5,3	V ₃	34	13
Alcoutim	I ₁	1 270	5	V ₃	34	14
Alenquer	I ₁	1 410	5,7	V ₂	33	12
Alfandega da Fé	I ₃	2 340	7,7	V ₂	33	15
Alijó	I ₃	2 500	7	V ₃	34	16
Aljezur	I ₁	1 120	5,3	V ₁	30	10
Aljustrel	I ₁	1 260	5,7	V ₃	35	17
Almada	I ₁	1 160	5,3	V ₁	31	10
Almeida	I ₃	2 540	7,7	V ₂	33	16
Almeirim	I ₁	1 340	5,7	V ₃	35	15
Almodôvar	I ₁	1 390	5,7	V ₃	35	16
Alpiarça	I ₁	1 360	5,7	V ₃	35	15
Alter do Chão	I ₁	1 340	6	V ₃	36	16
Alvaiázere	I ₂	1 810	6	V ₃	34	14
Alvito	I ₁	1 220	5,3	V ₃	36	18
Amadora	I ₁	1 340	5,7	V ₁	31	10
Amarante	I ₂	2 040	6,7	V ₂	33	13
Amares	I ₂	1 690	7	V ₂	32	14
Anadia	I ₁	1 460	6,3	V ₃	32	12